

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

OBJEMOVÉ ZMĚNY VYBRANÝCH CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ: VYHODNOCENÍ EXPERIMENTŮ

VOLUME CHANGES OF SELECTED CEMENTITIOUS COMPOSITES: TESTS EVALUATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

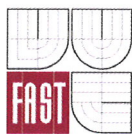
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

DENISA MACHAČOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. ZBYNĚK KERŠNER, CSc.

BRNO 201



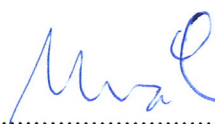
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3608R001 Pozemní stavby
Pracoviště	Ústav stavební mechaniky


ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Denisa Macháčová
Název	Objemové změny vybraných cementových kompozitů: vyhodnocení experimentů
Vedoucí bakalářské práce	doc. Ing. Zbyněk Keršner, CSc.
Specialista, konzultant	Ing. Petr Frantík, Ph.D.
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2011
Datum odevzdání bakalářské práce	25. 5. 2012

V Brně dne 30. 11. 2011


.....
prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
vedoucí ústavu




.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Český normalizační institut, 2006.

COLLEPARDI, M. Moderní beton. Informační centrum ČKAIT, Praha, 2009.

Další podklady podle pokynů vedoucího práce.

Zásady pro vypracování

Studium doporučených podkladů a souvisejících materiálů, průzkum webových zdrojů, orientace v problematice smršťování a dotvarování cementových kompozitů, vyhodnocení experimentálně i výpočtetně zjištěných objemových změn těles z vybraných betonů, diskuse výsledků, závěrečné shrnutí.

Předepsané přílohy

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací.



.....
doc. Ing. Zbyněk Keršner, CSc.
vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Zadaným tématem bakalářské práce je vyhodnocení experimentálně zjištěných objemových změn zkušebních těles z vybraných cementových kompozitů v raných stádiích tuhnutí a tvrdnutí. Materiál zkušebních těles byl obyčejný a lehký beton. Tato práce se zaměřuje na stanovení aproximací poměrných přetvoření zmíněných těles pomocí numerického modelu v programu *shrcec*.

Klíčová slova

smršťování, dotvarování, obyčejný beton, lehký beton, délkové přetvoření, poměrné posunutí, rané stádium tuhnutí a tvrdnutí, aproximace

Abstract

The topic of bachelor thesis is to evaluate experimentally observed volume changes of selected specimens of cement composites in the early stages of solidification and hardening. The material of tested specimens was ordinary and lightweight concrete. This work focuses on determining an approximation of the relative deformation of these specimens using a numerical model in the program *shrcec*.

Keywords

shrinkage, creep, ordinary concrete, lightweight concrete, longitudinal strain, the relative displacement, early stages of solidification and hardening, approximation

Bibliografická citace VŠKP

MACHAČOVÁ, D. *Objemové změny vybraných cementových kompozitů: vyhodnocení experimentů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky, 2012. 53 s., 4 s. příloh. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Zbyněk Keršner, CSc., specialista/konzultant Ing. Petr Frantík, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně, a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 25. 5. 2012

.....

podpis autorky

Poděkování

V první řadě mé největší poděkování patří doc. Ing. Zbyňkovi Keršnerovi, CSc., vedoucímu bakalářské práce, který mi byl po celou dobu nápomocen. Dále bych mu chtěla poděkovat za jeho trpělivost, za užitečné a cenné rady. Mé poděkování také patří těm, kteří jakkoli přispěli při zpracování mé bakalářské práce.

Dále bych chtěla poděkovat mým přátelům a mému pejskovi za psychickou podporu. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat mé rodině a to především mým rodičům, kteří mi umožnili tuto vysokou školu vystudovat.

Práce vznikla za podpory projektu GA ČR P104/10/2359 „*Přetvárné vlastnosti betonů vyšších pevností*“.

Obsah

1. ÚVOD	- 9 -
2. DOTVAROVÁNÍ	- 11 -
2.1 Ovlivňující faktory	- 11 -
3. SMRŠŤOVÁNÍ (NABÝVÁNÍ) BETONU	- 17 -
3.1 Druhy smršťování	- 17 -
3.2 Ovlivňující faktory	- 19 -
4. TEPLOTNÍ OBJEMOVÉ ZMĚNY	- 21 -
5. MĚŘENÍ OBJEMOVÝCH ZMĚN	- 22 -
5.1 Měření volného smrštění dotykovou metodou	- 22 -
5.2 Volné bezdotykové smrštění	- 22 -
6. ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA	- 23 -
6.1 Základní vztahy pro stanovení součinitele dotvarování	- 23 -
6.2 Základní vztahy pro stanovení poměrného přetvoření od smršťování vysycháním	- 26 -
7. APROXIMACE OBJEMOVÝCH ZMĚN	- 27 -
7.1 Zkušební zařízení	- 27 -
7.2 Numerický model	- 29 -
7.3 Výsledné aproximace	- 31 -
8. OBJEMOVÉ ZMĚNY LEHKÉHO BETONU	- 34 -
8.1 LC2 – Kamenivo s ložnou vlhkostí	- 34 -
8.2 LC3 – Kamenivo zcela nasycené vodou	- 37 -
8.3 Porovnání LC2 a LC3	- 40 -
9. OBJEMOVÉ ZMĚNY OBYČEJNÉHO BETONU	- 41 -
9.1 Obyčejný beton s kamenivem frakce max. 8 mm	- 41 -
9.2 Obyčejný beton s kamenivem frakce max. 22 mm	- 44 -
9.3 Porovnání obyčejného betonu s kamenivem frakce max. 8 mm a max. 22 mm	- 46 -
10. ZÁVĚR	- 48 -

11. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	- 49 -
12. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	- 51 -
13. SEZNAM PŘÍLOH	- 53 -
1. Výsledné hodnoty parametrů aproximace.....	- I -

1. Úvod

Kompozitní materiál je materiál, který je tvořen ze dvou nebo více složek s rozdílnými vlastnostmi, které dávají výslednému materiálu vlastnosti nové. K nejpoužívanějším stavebním kompozitům patří beton. Základní částí betonu je cementový tmel. Objevení hydraulického pojiva, tedy cementu, způsobilo nahrazení zdění betonováním. Cement se začal vyrábět v Anglii v polovině 19. století. Odtud také pochází název portlandský cement, jelikož tento materiál byl vyráběn v portlandském hrabství (WIKIPEDIA, *Kompozitní materiál*. [online], [9]).

Cement je práškové pojivo, které po smíchání s vodou tuhne a tvrdne. Tuhnutí a tvrdnutí cementu smíseného s vodou je výsledkem složitých chemických a fyzikálních procesů, které označujeme za hydrataci cementu. Jev, který vzniká při chemickém procesu hydratace cementu, je uvolňování hydratačního tepla. Beton se tímto teplem zahřívá. Teplo napomáhá odpařování vody ze směsi, a tím způsobuje objemové změny (WIKIPEDIA, *Cement*. [online], [10]).

Objemové změny betonu mají podstatný vliv na pozdější vlastnosti betonu. Základní charakteristikou přetvoření betonu, která zahrnuje pojmy smršťování, v opačném případě nabývání, a dotvarování betonu, je závislost jejich velikosti a průběh na čase. Dotvarování a smršťování betonu ovlivňuje napjatost a deformaci konstrukce. Smršťování a nabývání vznikají bez vlivu zatížení a je způsobeno přestupem vody z betonu do prostředí a dalšími jevy. Dotvarování je závislé na namáhání betonu.

Přetvoření od smršťování a dotvarování je složitý jev, neboť je závislé na čase. Přetvoření, které je závislé na napětí, je buď okamžité, nebo zpožděné. Přetvoření jsou také vratná nebo nevratná. Vratná přetvoření jsou způsobená od změny teploty a vlhkosti, kdežto nevratná přetvoření vznikají od smršťování nebo nabývání (ŠMERDA, Z., KŘÍSTEK, V., 1978, s. 11).

Betonový prvek se může vlivem trvalého konstantního napětí volně přetvářet. To způsobuje deformaci prvku následkem dotvarování. Zabráníme-li přetvoření od dotvarování, dojde ke snížení napětí a vznikne relaxace. Relaxace je často spojována s dotvarováním, jelikož mezi nimi existují vzájemné vztahy. Relaxaci rozumíme zmenšování napětí při konstantním přetvoření (ŠMERDA, Z., KŘÍSTEK, V., 1978, s. 18).

Cílem předkládané bakalářské práce je ověření, zda lze numerický model realizovaný programem *shrcec* použít pro vyhodnocení experimentálně zjištěných objemových změn zkušebních těles z vybraných cementových kompozitů.

Výsledkem této práce jsou aproximace poměrného posunutí zkoumaných těles z obyčejného a lehkého betonu.

2. Dotvarování

Dotvarování má svůj původ v mikrostruktuře cementového tmelu, který spojuje zrna kameniva. Jeho základní hmotou je cementový gel, který je velmi homogenní hmotou s emulzním charakterem. Obsahuje vodu, jednak vázanou a vodu volnou. Voda, která není chemicky vázaná, se vytlačuje z mikropórů gelu do kapilár a postupuje až k povrchu betonu, kde se odpařuje. Ztráta vody způsobuje, že napětí přechází z viskózního prostředí více na pružnou část betonu. Napětí, která se nachází na pružné části betonu, způsobí, že přetvoření po odtížení se mohou z části vrátit (ŠMERDA, Z., KŘÍSTEK, V., 1978, s. 20).

Dotvarování betonu je deformace, která je vratná a z části nevratná. Jmenované deformace se zvětšují s časem. Velikost dotvarování závisí na napětí betonu, na jeho struktuře vzhledem k vlastnostem jednotlivých složek, na konzistenci směsi a na stupni hydratace. Dále je ovlivňováno prostředím a jeho teplotou (ŠMERDA, Z., KŘÍSTEK, V., 1978, s. 11).

Dotvarování má v některých případech závažný vliv na celkový stav betonové konstrukce. U ohýbaných konstrukcí může dotvarování způsobit nepříjemný vzrůst průhybu. Naopak u tlačených konstrukcí, zejména namáhány mimostředním tlakem, se může vlivem dotvarování zvětšit jejich vybočení. Oproti dotvarování se relaxace u staticky neurčitých konstrukcí projevuje příznivě, jelikož zmenšuje napětí způsobená kolísáním teplot, smršťováním betonu nebo dalšími účinky (PROCHÁZKA, J., a kol., 2005, s. 69).

2.1 Ovlivňující faktory

Podle ŠMERDY, Z., KŘÍSTKA, V. (1978, s. 26–48) se u dotvarování uvažuje vliv prostředí a stáří betonu při zatížení. Další faktory, které ovlivňují dotvarování, jsou stáří betonu, prostředí, rozměry prvku, druh cementu a kameniva, vodní součinitel, teplota a ošetřování betonu, druh namáhání, modul pružnosti, zatížení betonu a lineární a nelineární dotvarování.

Stáří betonu

Vlivem účinku napětí se beton dotvaruje. Průběh dotvarování je v první fázi rychlejší, později se tato rychlost zmenšuje. V první fázi dojde k 80–90 % celkového dotvarování a přetvoření a úplně vymizí do 5 let.

Beton, který se zatíží později, má nižší hodnotu dotvarování. Toto dotvarování má jiný průběh než u betonu zatíženého okamžitě.

Prostředí

Pro dotvarování je důležité získat vlastnosti prostředí, ve kterém je prvek ponechán. Hodnoty dotvarování jsou závislé na hygrometrických podmínkách. V sušším prostředí je dotvarování velké, ve vodě malé nebo skoro žádné.

Rozměry prvku

Důležitým prvkem je velikost povrchu, která přichází do styku s prostředím a zprostředkovává záměnu vlhkostí mezi betonem a okolím. Prvky s menšími rozměry se dotvarují více než prvky s většími rozměry.

Druh cementu

Důležitý je druh cementu, zejména rychlost jeho tvrdnutí. Dotvarování probíhá v zatvrdlém cementovém tmelu, proto přetvoření z dotvarování jsou větší u betonů bohatých na rychle tuhnoucí cement, jemné složky, a také u betonů „hubených“ s velkým vodním součinitelem. U betonů s pórovitým kamenivem velikost přetvoření z dotvarování závisí i na druhu kameniva. Přítomnost pórů zvětšuje účinky dotvarování, proto přetvoření vyvozená dotvarováním jsou menší u hutných betonů. (PROCHÁZKA, J., a kol., 2005, s. 66).

Druh kameniva

Kamenivo má vliv na velikost dotvarování, ale ve většině případů se zanedbává. Dotvarování u lehkých betonů není prozatím dostatečně specifikováno. Beton z různých umělých pórovitých kameniv má rozdílné stupně dotvarování. Dotvarování lehkého betonu může být i nižší i vyšší než u obyčejného betonu.

Vodní součinitel

Poměr vody k cementu má značný vliv na dotvarování, zvláště u betonu, který je specifikován velmi nízkou hodnotou vodního součinitele ($v_m: c$).

Teplota a ošetřování betonu

Vliv vnější teploty se ve většině případů zanedbává. V normálním prostředí, v němž teplota betonu kolísá je v rozmezí -10°C do $+40^{\circ}\text{C}$, není účinek teploty na dotvarování moc velký. U konstrukcí jako jsou např. zásobníky s dlouhotrvajícími vysokými teplotami apod. a u betonu s tepelným zpracováním betonové směsi musíme na vliv teploty pamatovat. Vliv teploty lze rozdělit na účinky, které působí na beton v provozním stavu, a na účinky krátkodobé, které se vyskytují při výrobě betonu, které mění velikost dotvarování. Velikost dotvarování ovlivňuje urychlování tvrdnutí betonu propařováním a autoklávováním. Dotvarování autoklávováním je mírné s porovnáním mezi dotvarováním betonu ošetřovaného normálně.

Druh namáhání

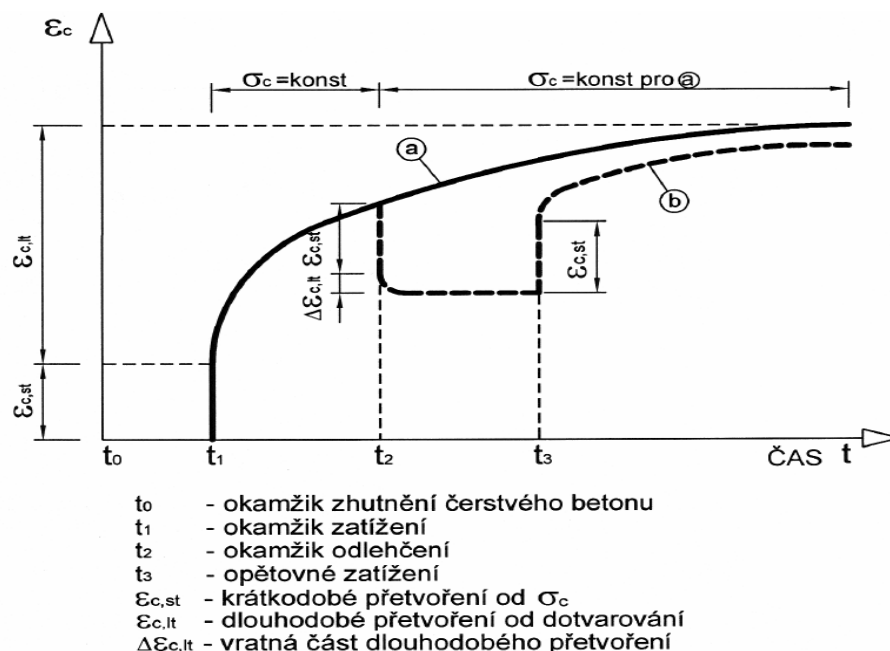
Průběh dotvarování betonu v tahu je v podstatě stejné jako při namáhání tlakem. Dotvarování v tahu probíhá rychleji v prvních fázích. Vlivem působení opakovaného namáhání se zvětšuje trvalá deformace betonu. Velikost dotvarování závisí na stáří t betonu v čase, kdy vnější zatížení začalo působit. Průběh dotvarování je podobný jako při statickém zatížení.

Modul pružnosti

S nárůstem pevnosti se mění také modul pružnosti betonu a s ním pružné přetvoření ε_e , kterým je určeno dotvarování ε_d . Pevnost betonu $R_{b(t)}$ i modul pružnosti $E_{b(t)}$ probíhají v čase jako dotvarování.

Zatížení betonu

Dle TERZIJSKÉHO, I. (2005, s. 34) po dosažení určitého stupně zatížení a ponechání tohoto zatížení na konstrukci, zjistíme, že přetvoření dále narůstají, i když neroste působící zatížení. Tato přetvoření nazýváme zpožděnými $\varepsilon_{c,lt}$ – (viz obr. 2.1) křivka (a). Pokud konstrukci odlehčíme, zjistíme, že i zpožděná přetvoření mají část pružnou a část plastickou (nevratnou) – (viz obr. 2.1) křivka (b). Při opětovném zatížení na původní úroveň napjatosti přetvoření znovu vzrostou a průběh dotvarování dále limituje ke křivce (a) odpovídající konstantnímu zatížení.



Obr. 2.1: Dotvarování betonu při konstantním a přerušovaném zatížení

(TERZIJSKI, I. CM1 – Základy navrhování konstrukcí, Brno, 2005, s. 34)

Lineární a nelineární dotvarování

Podle PROCHÁZKY, J. (2009, s. 67, 68) pro dlouhodobé působící napětí $\sigma_c \leq 0,45f_c$ (rozsah napětí betonu při běžném provozním zatížení) lze předpokládat, že přetvoření z dotvarování jsou přímo úměrná pružným přetvořením ε_c .

Platí tedy:

$$\frac{\varepsilon_{cc}(t, t_0)}{\varepsilon_c} = \varphi(t, t_0)$$

kde: $\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E_c}$ přetvoření betonu bezprostředně po jeho zatížení

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \varphi(t, t_0) \varepsilon_c,$$

kde $\varphi(t, t_0)$ konečná hodnota součinitele dotvarování,

σ_c tlakové napětí betonu,

E_c modul pružnosti betonu,

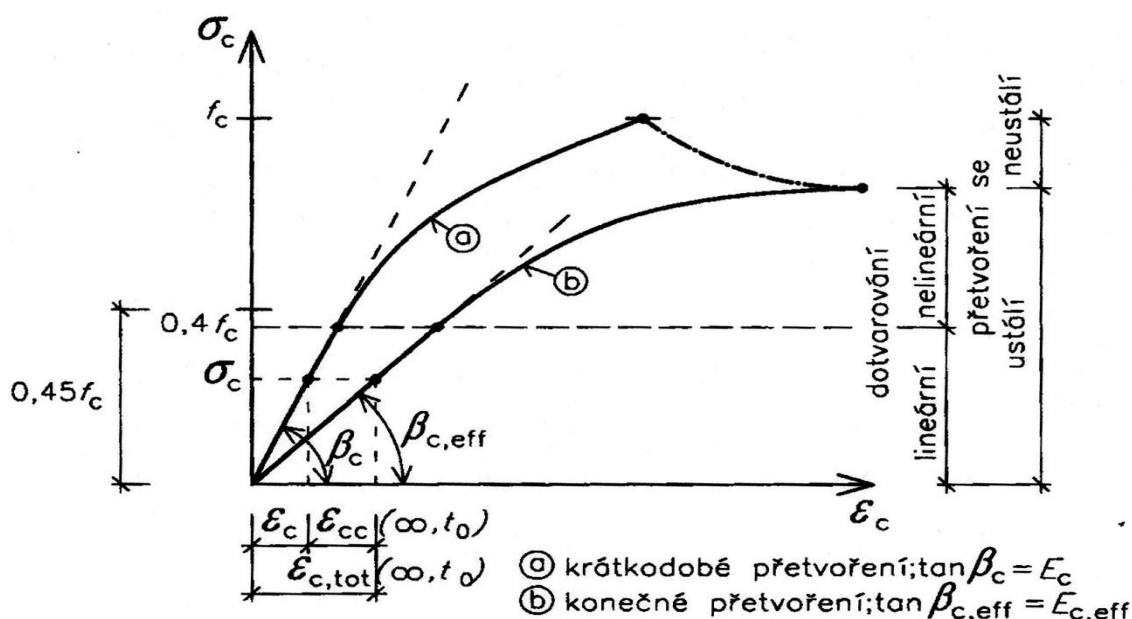
t zatížení v okamžiku t ,

t_0 zatížení v okamžiku t_0 .

V oblasti lineárního dotvarování je možno vyjádřit přetvoření z dotvarování pomocí účinného modulu pružnosti betonu $E_{c,eff}$ (viz Obr. 2.2) daného vztahem:

$$E_{c,eff} = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c + \varphi(t_1, t_0) \varepsilon_c} = \frac{E_c}{1 + \varphi(t_1, t_0)},$$

kde: $E_{c,eff}$ účinný modul pružnosti,
 σ_c tlakové napětí betonu,
 ε_c přetvoření betonu bezprostředně po jeho zatížení,
 $\varphi(t_1, t_0)$ součinitel dotvarování,
 t_1 moment zatížení,
 t_0 moment zatížení.



Obr. 2.2: Závislost přetvoření vyvozeného dotvarováním na velikosti napětí a na době působení tohoto napětí (PROCHÁZKA, J., a kol., *Navrhování betonových konstrukcí I., Praha, 2009, s. 68*)

Pokud dlouhodobě působící napětí překročí hodnotu $0,45 f_c$, ale setrvává menší než pevnost betonu při dlouhodobém zatížení (cca $0,8 f_c$), je toto dotvarování nelineární (viz Obr. 2.2). Toto dotvarování nastává u předpjatého betonu v úseku předpínací výztuže, proto je nutné opravit konečnou hodnotu součinitele dotvarování:

$$\varphi_k(t, t_0) = \varphi(t, t_0) \exp[1,5(k_c - 0,45)],$$

kde: k_c je poměr napětí $\frac{\sigma_c}{f_{c(t_0)}}$

kde: σ_c je tlakové napětí,

$f_{c(t_0)}$ je pevnost betonu v okamžiku zatížení.

Existuje řada teorií pro výpočet přetvoření vyvozeného dotvarováním betonu, které vycházejí z různých předpokladů.

Nejstarší teorie zpožděné pružnosti vychází z předpokladu, že v době zatížení nemá vliv na velikost dotvarování stáří betonu. Tato teorie předpokládá, že dotvarování zcela vymizí po odtížení betonu.

Teorie stárnutí naopak zohledňuje vliv stáří betonu na velikost dotvarování. Při zatížení staršího betonu dostaneme menší přetvoření od dotvarování, než je ve skutečnosti. Zanedbává vratnost přetvoření.

Chování betonu při dotvarování je někde uprostřed těchto teorií. Teorie zpožděné pružnosti se stárnutím je výstižnější než obě předešlé teorie. Určuje rozdíl mezi teorií zpožděné pružnosti a teorií stárnutí. Přihlíží k vratnosti přetvoření.

3. Smršťování (nabývání) betonu

Smrštění je komplexní jev. Největší mírou k jeho výzkumu přispěli Powers, Brunauer a Wittmann. Tito autoři se domnívají, že smrštění je spjato s molekulami vody, které se nacházejí mezi zrny hydratujícího cementu, a že důležitou roli hraje kapilární kondenzace a povrchové napětí. Na druhé straně podle Feldmannova a Fredova modelu hrají při smrštění nejdůležitější roli molekuly vody, které se nacházejí ve struktuře C-S-H gelu, mezi jeho vrstvami, odkud během jeho vysychání unikají (COLLEPARDI, M., 2009, s. 207).

Objemové změny betonu a cementových kompozitů způsobují poruchy v jejich struktuře. Snižují pevnost a hlavně životnost konstrukcí. Běžný kompozit, který je pojený cementem, se v průběhu vysychání a teplotních změn smršťuje. U smršťování rozlišujeme čtyři druhy smrštění. Jedná se o smrštění plastické, smrštění způsobené vysycháním, autogenní smrštění a karbonatační smršťování. Z těchto čtyř druhů smrštění je nejvýznamnější smrštění způsobené vysycháním tvrdnoucího betonu. Deformace snížíme vhodným složením, zpracováním a ošetřováním betonu.

Poměrné přetvoření ze smršťování ε_{cs} je udáváno jako součet poměrného přetvoření ze smršťování vysycháním ε_{cd} a poměrného přetvoření z autogenního smršťování ε_{ca} :

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}.$$

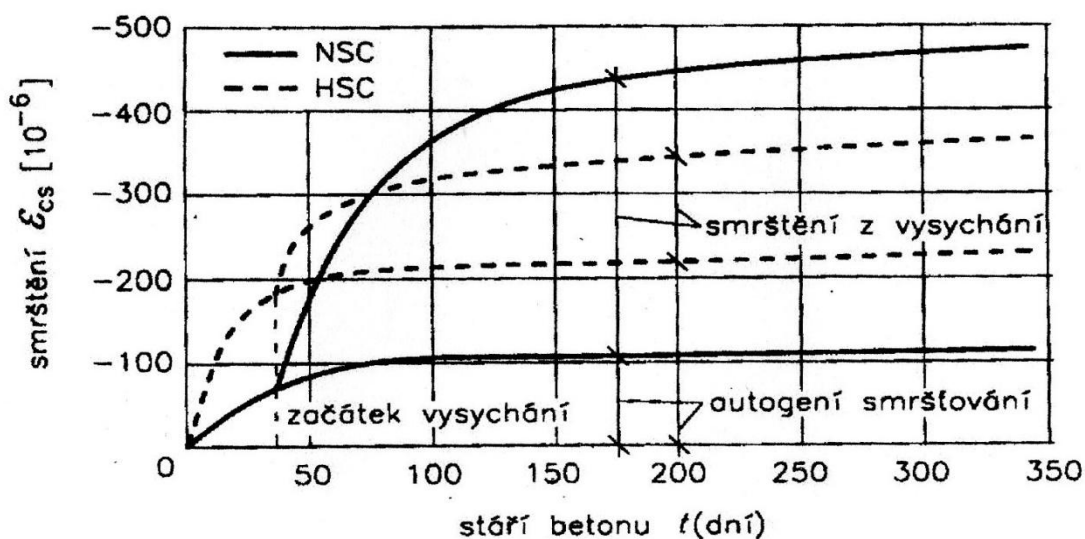
Na Obr. 3.1 je znázorněna časová závislost poměrného přetvoření autogenního smršťování ε_{ca} a smršťování z vysychání ε_{cd} pro běžné betony (NSC) a pro vysokopevnostní betony (HSC); (PROCHÁZKA, J. a kol., 2005, s. 70).

3.1 Druhy smršťování

Plastické smrštění

Podle COLLEPARDIHO, M. (2009, s. 207) plastické smrštění nastává tehdy, pokud je beton v plastickém stavu. Tento typ smrštění nastává obvykle 10–12 hodin po uložení betonu do formy a pokud je beton vystaven vzduchu s relativní vlhkostí menší než 95%. Dále je vystaven větru a vysoké teplotě. Tyto tři vlivy způsobují plastické smrštění. Pokud se objeví na povrchu betonu voda, která nahrazuje

odpařovanou vodu, k plastickému smrštění nedochází. Smrštění může být redukováno také ocelovou výztuží, nebo třením mezi betonem a betonem podkladu.



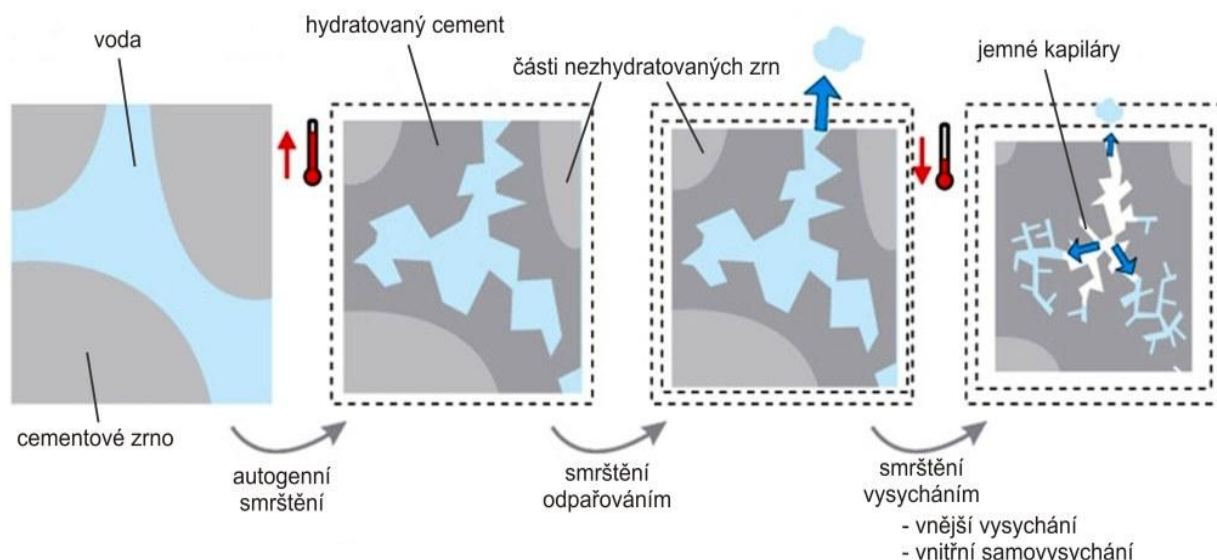
Obr. 3.1: Časová závislost poměrného autogenního smršťování a smršťování z vysychání (PROCHÁZKA, J., a kol., Navrhování betonových konstrukcí I, Praha, 2009, s. 70)

Smršťování vysycháním

Smrštění vysycháním je jev, u kterého je použit regulátor tuhnutí např. sádrovec. Pokud cement obsahuje méně regulátorů, než je doporučeno, může být smrštění vysycháním menší. Smrštění vysycháním neovlivňuje voda, pokud neobsahuje škodlivé látky. Další faktor ovlivňující smrštění vysycháním je kamenivo, neboť působí jako překážka, která zabraňuje hydratujícím cementovým zrnům, aby rozvíjely smrštění. Čím hutněji je kamenivo uspořádáno, tím více je bráněno smrštění od cementové pasty (COLLEPARDI, M., 2009, s. 209–210).

Autogenní smršťování

Podle COLLEPARDIHO, M. (2009, s. 217–218) u betonů s velice nízkým vodním součinitelem, které jsou označovány za vysokohodnotné betony, dochází k autogennímu smrštění. Autogenní smrštění je makroskopická objemová změna, ke které dochází v případě, že je zabráněno výměně vody mezi betonem a okolím.



Obr. 3.2.: Druhy smršťování (EBETON. Smršťování betonu [online], [11]).

3.2 Ovlivňující faktory

Podle ŠMERDY, Z., KŘÍSTKA, V. (1978, s. 49–54) spočívá přetvoření betonu na tom, že se cementový gel smršťuje nebo nabývá na objemu. V suchém prostředí se z něj odpařuje voda, která není chemicky vázaná (smršťování). Naopak pokud gel vodu přijme z prostředí, jedná se o nabývání. Smršťování a nabývání závisí na prostředí, na stáří betonu, na jeho složení, na rozměrech prvku atd.

Vliv času a stáří betonu

Beton, který se nachází v prostředí, se stálou teplotu a vlhkostí, se smršťuje tak, že v první fázi se beton smršťuje rychleji, později se rychlost zmenšuje. Ve vodě nabývá beton na objemu a nárůst přetvoření je obdobný, ale plynulejší.

Rozměry prvku

Na smršťování má velký vliv hygrometrický stav prostředí. Je zřejmé, že o vlhkosti rozhoduje povrch prvku, který přichází s okolím do styku.

Vodní součinitel, druh cementu a teplota

Značný vliv na smršťování betonu má vodní součinitel. Čím je vyšší, tím je také smršťování větší. Na vodním součiniteli závisí v určitém rozsahu pevnost betonu

a nejvíce pórovitost. Čím větší je součinitel, tím poréznější je beton a tím výhodnější jsou podmínky pro intenzivnější výměnu vlhkosti betonu s prostředím.

Druh použitého cementu má menší vliv na smrštění. Většinou jej zanedbáváme. Vliv teploty je obdobný jak u dotvarování. Smršťování nemusí mít škodlivé účinky, pokud probíhá bez překážek. Pokud je zabráněno volnému probíhání deformací, vznikají v betonu napětí, která mohou způsobit potrhání betonu. Při styku dvou betonů různého stáří, nebo na podkladu, který se nesmršťuje, brání starší beton volnému smršťování čerstvého (mladého) betonu. Vliv smršťování lze omezit dodržením různých zásad. Vlhčení betonu po zabetonování zpomalí a omezí smrštění do té doby, než bude mít větší tahovou pevnost. Také lze účinky smrštění omezit správným složením betonové směsi, vhodnými konstrukčními opatřeními (dilatační spáry).

4. Teplotní objemové změny

Beton mění svůj objem při změně teploty. Stoupá-li teplota, objem cementového kompozitu se zvětšuje a naopak. Velikost těchto objemových změn je vyjádřena pomocí součinitele teplotní roztažnosti $\alpha = 1 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Velikost délkového přetvoření je dána vztahem:

$$\Delta l = \alpha \Delta T l$$

kde l je délka prvku,

ΔT teplotní rozdíl v $^{\circ}\text{K}$.

Pokud se brání objemovým změnám, které jsou vyvolané kolísáním teploty, vznikají v konstrukci podružná napětí jak v tahu, tak v tlaku. Potrhání betonu způsobí pouze tahová napětí. Konstrukce staticky neurčité a konstrukce masivní jsou citlivé na kolísání teplot.

Podružná napětí se omezí pomocí dilatačních spár. Vzdálenost dilatačních spár se volí dle způsobu vyztužení, způsobu provádění a podle charakteru konstrukce.

(PROCHÁZKA, J. a kol., 2005, s. 71–72).

5. Měření objemových změn betonu

Jak uvádí LITOŠ, J. (2010, s. 28–29) měření je důležitým prvkem při procesu zjišťování dotvarování a smršťování betonu a cementových kompozitů. Jedná se o měření tzv. „volného“ smrštění, tj. délkových změn zkušebního tělesa, které je volně uloženo v měřicím zařízení. Známe dvě základní metody měření, z nichž jedna metoda se běžně nepoužívá z důvodů přístrojové náročnosti.

5.1 Měření volného smrštění dotykovou metodou

Měření se provádí na zkušebních tělesech – hranol 100×100×400 mm. Čela vzorků jsou opatřena dotykovými hroty nebo po odbednění je zkušební těleso zajištěno speciálními ploškami. Vzorky jsou po 24 hodinách ponechány v měřicím stojánku, který je vybaven pevným mechanickým nebo digitálním úchylkoměrem (tzv. „tisícinové“ hodinky).

Po provedení základního měření se zkušební těleso uloží do definovaného prostředí. Důležitým prvkem je snímání teploty a vlhkosti tak, aby tyto faktory mohly být zohledněny při vyhodnocení.

Měření se provádí jak na vzduchu v tzv. normálních laboratorních podmínkách s relativní vlhkostí 60%, tak i v prostředí s relativní vlhkostí 95% (případně pod vodou). Vzhledem k tomu, že dotykové měření lze zpravidla realizovat až po 24 hodinách od smíchání cementu a vody, nelze prakticky postřehnout fázi tzv. autogenního smrštění.

5.2 Volné bezdotykové smrštění

Tento způsob měření je vhodný pro sledování autogenního smrštění. Využívá se infračervených diod a optického přijímače. Další nezbytnou součástí jsou tzv. pryžové vlnovcové formy, které umožňují bezproblémovou deformaci tuhnutí cementové suspenze a okamžité zahájení měření. Tato metoda není moc používaná vlivem přístrojové náročnosti, může poskytovat informace o objemových změnách cementových malt a betonů v průběhu prvních hodin.

6. Česká technická norma

Podle EN 1992-1-1 Eurokódu 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby (2006, s. 32-33, 178-180) je dotvarování a smršťování betonu závislé na okolní vlhkosti, na rozměrech prvku a na složení betonu, jak již bylo zmíněno.

Součinitel dotvarování, $\varphi(t, t_0)$ se vztahuje k tečnovému modulu E_c , který lze uvažovat hodnotou $1,05 \cdot E_{cm}$. Součinitel dotvarování je číslo, kterým je třeba násobit krátkodobou deformaci vyvolanou dotvarováním. Nabývá hodnot od 0–6, podle stáří betonu při zatěžování, podle složení betonu, podle podmínek vnějšího prostředí, atd.).

6.1 Základní vztahy pro stanovení součinitele dotvarování

Součinitel dotvarování lze vypočítat ze vztahu:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \beta_c(t, t_0)$$

kde φ_0 je základní součinitel dotvarování, který lze stanovit:

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0),$$

φ_{RH} je součinitel vystihující vliv relativní vlhkosti na základní součinitel dotvarování

$$\varphi_{RH} = 1 + \frac{1 - RH/100}{0,1 \sqrt[3]{h_0}} \quad \text{pro } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa}$$

$$\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1 - RH/100}{0,1 \sqrt[3]{h_0}} \alpha_1 \right] \alpha_2 \quad \text{pro } f_{cm} \geq 35 \text{ MPa}$$

RH je relativní vlhkost okolního prostředí v %,

$\beta(f_{cm})$ součinitel vystihující vliv pevnosti betonu na základní součinitel dotvarování:

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}},$$

f_{cm} průměrná hodnota pevnosti betonu v tlaku v MPa ve stáří 28 dní,

$\beta(t_0)$ součinitel vystihující vliv stáří betonu v okamžiku vnesení zatížení na základní součinitel dotvarování:

$$\beta(t_0) = \frac{1}{(0,1 + t_0^{0,02})},$$

h_0 náhradní rozměr prvku v mm, kde:

$$h_0 = \frac{2A_c}{u},$$

A_c plocha průřezu,

u obvod prvku vystavený okolnímu prostředí,

$\beta_c(t, t_0)$ součinitel časového průběhu dotvarování po zatížení, lze ho stanovit z následujícího vztahu:

$$\beta_c(t, t_0) = \left[\frac{(t-t_0)}{(\beta_H + t - t_0)} \right]^{0,3},$$

t stáří betonu ve dnech v uvažovaném okamžiku,

t_0 stáří betonu ve dnech v okamžiku vnesení zatížení,

$t - t_0$ neupravená doba trvání zatížení ve dnech,

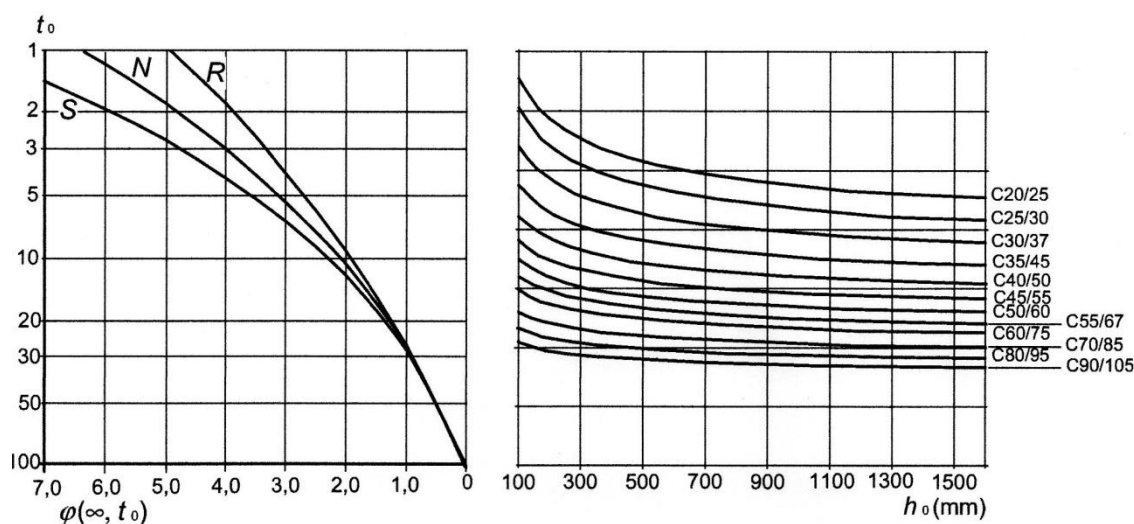
β_H součinitel závislý na relativní vlhkosti (RH v %) a na náhradním rozměru prvku (h_0 v mm), lze ho stanovit:

$$\beta_H = 1,5 [1 + (0,012RH)^{18}] h_0 + 250 \leq 1500; f_{cm} \leq 35 \text{ MPa}$$

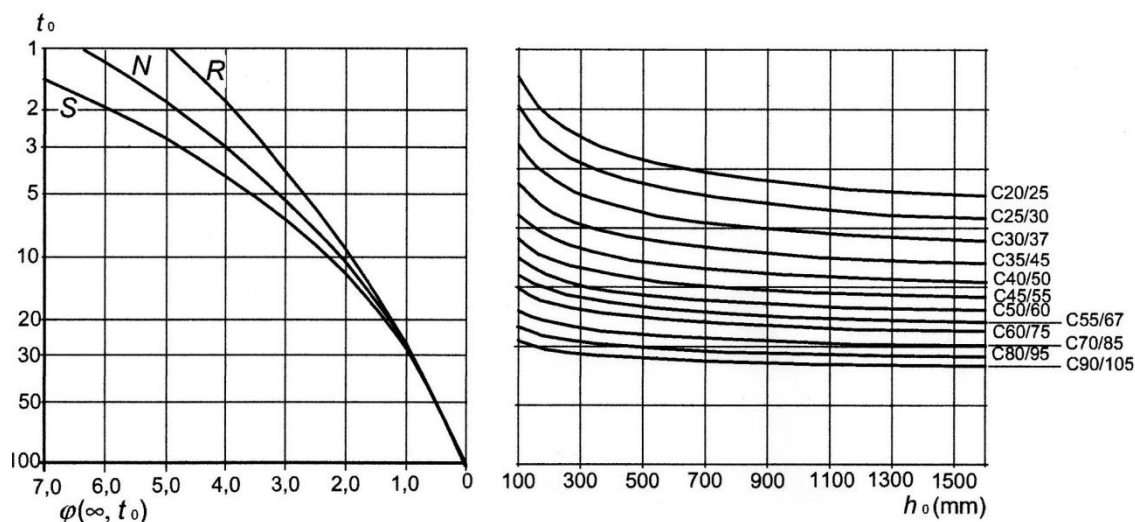
$$\beta_H = 1,5 [1 + 0,012RH)^{18}] h_0 + 250 \alpha_3 \leq 1500 \alpha_3; f_{cm} \leq 35 \text{ MPa}$$

$\alpha_{1/2/3}$ součinitel vlivu pevnosti betonu:

$$\alpha_1 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,7} \quad \alpha_2 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,2} \quad \alpha_3 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,5}$$



Obr. 6.1: Postup stanovení součinitele dotvarování $\varphi(t, t_0)$ pro beton uložený v běžném prostředí, vnitřní prostředí (ČSN EN 1992-1-1, 2006, s. 32)



Obr. 6.2: Postup stanovení součinitele dotvarování $\varphi(t, t_0)$ pro beton uložený v běžném prostředí, vnější prostředí (ČSN EN 1992-1-1, 2006, s. 32)

Vliv druhu cementu na součinitel dotvarování betonu lze uvažovat úpravou stáří betonu v okamžiku vnesení zatížení t_0 podle následujícího vztahu:

$$t_0 = t_{0,T} \left(\frac{9}{2+t_{0,T}^{1,2}} + 1 \right)^\alpha \geq 0,5$$

kde $t_{0,T}$ je stáří betonu ve dnech v okamžiku vnesení zatížení, upravené s přihlédnutím k vlivu teploty

α mocnitel vystihující vliv druhu cementu:

= -1 pro cement třídy S,

= 0 pro cement třídy N,

= 1 pro cement třídy R.

Vliv zvýšených nebo snížených teplot v rozsahu 0 °C až 80 °C na zralost betonu lze uvažovat úpravou stáří betonu podle následujícího vztahu:

$$t_T = \sum_{i=1}^n e^{-\left(\frac{4000}{[273+T(\Delta t_i)]} - 13,65\right) \Delta t_i}$$

kde t_T je stáří betonu upravené s přihlédnutím k vlivu teploty, kterým se nahrazuje t v příslušných vztazích,

$T(\Delta t_i)$ teplota ve °C během období Δt_i ,

Δt_i počet dní, v nichž převládá teplota T .

Průměrný variační součinitel hodnot dotvarování určených podle výše uvedených vztahů, odvozených z databanky výsledků laboratorních zkoušek, je přibližně 20%.

6.2 Základní vztahy pro stanovení poměrného přetvoření od smršťování vysycháním

Základní poměrné přetvoření od smršťování vysycháním $\varepsilon_{cd,0}$ se vypočítá ze vztahu:

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \left[(220 + 110 \alpha_{ds1}) \exp \left(-\alpha_{ds2} \frac{f_{cm}}{f_{cmo}} \right) \right] 10^{-6} \beta_{RH}$$

$$\beta_{RH} = 1,55 \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right]$$

kde f_{cm} je průměrná hodnota pevnosti betonu v tlaku (MPa),

$f_{cmo} = 10$ MPa,

α_{ds1} součinitel, který závisí na druhu cementu:

= 3 pro cement třídy S,

= 4 pro cement třídy N,

= 6 pro cement třídy R,

RH relativní vlhkost okolního prostředí (%),

$RH_0 = 100$ %,

α_{ds2} součinitel, který závisí na druhu cementu:

= 0,13 pro cement třídy S,

= 0,12 pro cement třídy N,

= 0,11 pro cement třídy R.

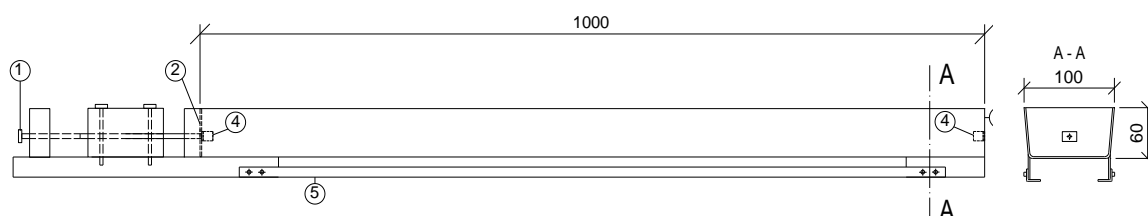
7. Aproximace experimentálně zjištěných objemových změn

V následující kapitole budou rozepsány postupy, které slouží pro experimentální zjištění objemových změn a jejich vyhodnocení, včetně numerické aproximace.

Podle Frantík, P., Kucharczyková, B., Keršner, Z. (2010, s. 1–8) lze při tuhnutí a tvrdnutí betonu pozorovat řadu probíhajících jevů, především smršťování vlivem samovysychání a nabývání vlivem postupného uvolňování vody z kameniva. Pomocí níže popsaného numerického modelu jsou v programu *shrcec* aproximovány vybrané naměřené řady hodnot délkového poměrného přetvoření zkušebních těles z lehkého (viz kapitola 8) a obyčejného betonu (viz kapitola 9).

7.1 Zkušební zařízení

Pro stanovení objemových změn v raném stádiu tvrdnutí betonu se použilo zkušební zařízení firmy Schleibinger Geräte Teubert u. Greim GmbH.



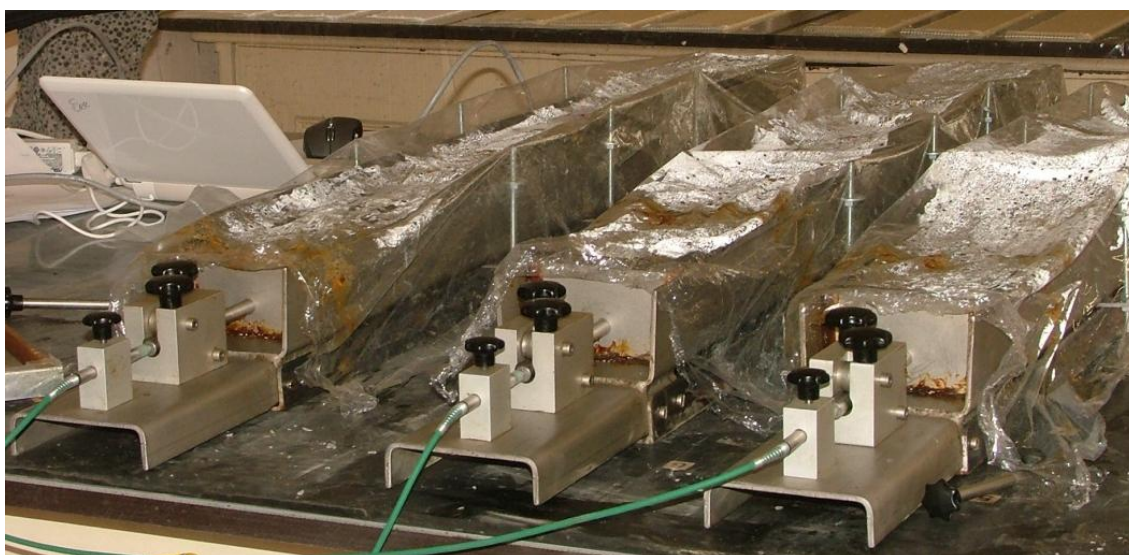
- 1 Fixační kolík, který zajišťuje polohu pohyblivého čela před zahájením měření
- 2 Pohyblivé čelo
- 3 Pevné čelo
- 4 Odnímatelné kotevní háky
- 5 Kovové lišty, které umožňují fixaci měřicího zařízení k vibračnímu stolu

Obr.7.1: Schéma měřicího zařízení – žlab Schleibinger

(Frantík, P., Kucharczyková, B., Keršner, Z, 2010, s. 3)

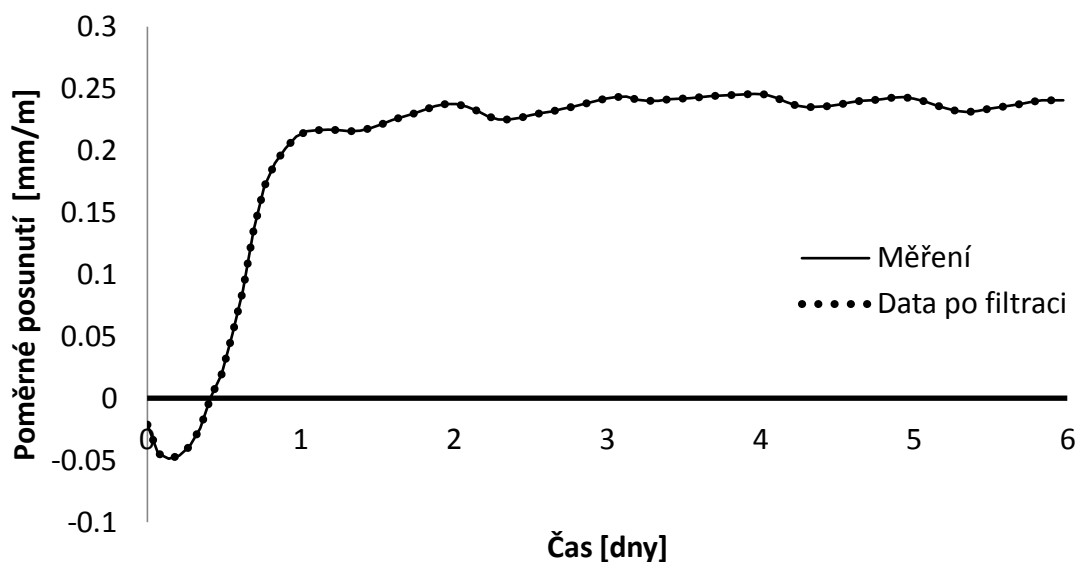
Zkušební žlaby s délkou 1 000 mm a příčným průřezem 60×100 mm se použily pro měření délkových změn v podélné ose zkušebního tělesa (viz schéma na Obr. 7.1). Vnitřní stěny žlabu byly opatřeny hladkou, měkkou a nenasákavou neoprenovou folií tl. 2 mm. Díky tomu bylo minimalizováno tření mezi betonem a stěnou formy

Všechna zkušební tělesa betonu byla ukládána do zkušebního žlabu vždy ve dvou vrstvách. Každá vrstva byla vždy řádně zhutněna. Doba hutnění byla určena podle konzistence čerstvého betonu. Po zhutnění betonu byly žlaby přemístěny na stabilní laboratorní stůl. Následující měření nebylo ovlivňováno žádnými účinky, jako jsou případné otřesy. Hodinu poté, co byla betonová směs vložena do žlabu, se jeho povrch opatřil plastovou folií, aby se zamezilo nadměrnému vysychání povrchu betonu v počáteční fázi tvrdnutí (viz Obr 7.2). Plastová folie byla sejmuta po třech dnech. Měření poměrného posunutí bylo zahájeno hodinu po uložení a zhutnění betonu ve zkušebních žlabech. Poznamenejme, že měření byla prováděna v laboratoři Ústavu stavebního zkušebnictví FAST VUT v Brně pod vedením Ing. Barbary Kucharczykové, Ph.D.

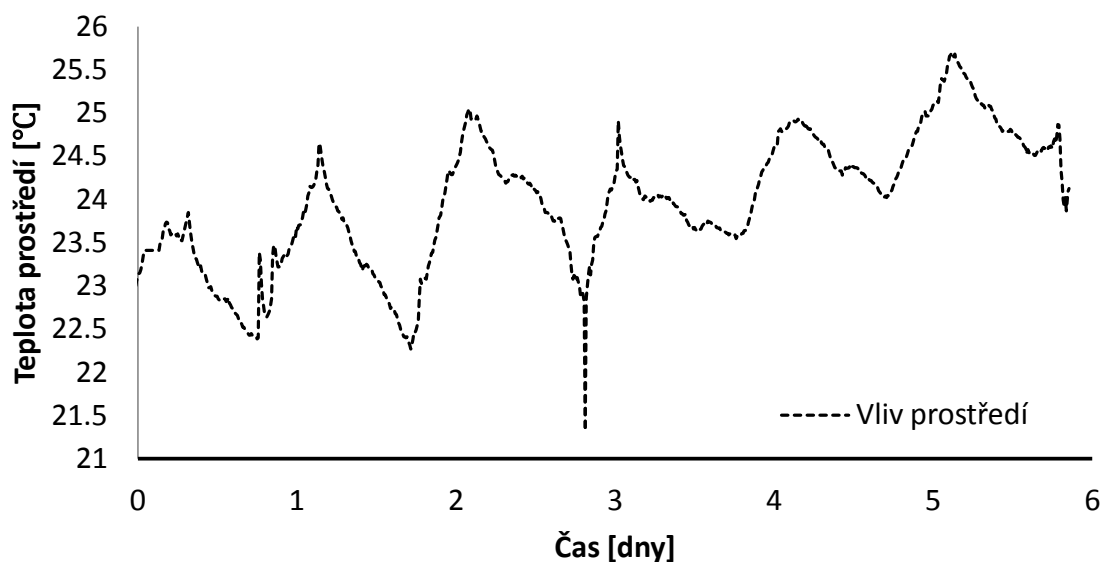


Obr. 7.2: Měřicí žlaby naplněné betonem (Frantík, P., Kucharczyková, B., Keršner, Z., 2010, s. 3)

Pro zahájení výpočtů pomocí numerického modelu v programu *shrcec* je potřeba mít výsledky měření, a to časové řady vzájemného posunutí čel žlabu – hodnoty poměrného posunutí (viz Obr. 7.3) a časové řady teploty prostředí, ve kterém byly žlaby uskladněny (viz Obr. 7.4).



Obr. 7.3: Časové řady poměrného posunutí čel žlabu: měření a filtrovaná data



Obr. 7.4: Časové řady teploty prostředí

7.2 Numerický model

Z hlediska návržení modelu pro aproximaci jsou na časových řadách vzájemného posunutí patrné tři složky: Počáteční zvlnění, dlouhodobé ustalování a určitá periodická porucha. Periodická porucha byla identifikována jako zpožděný vliv teploty

prostředí. Dlouhodobé ustálení a počáteční zvlnění má původ v objemových změnách cementového kompozitu v důsledku zrání.

Odpovídajícím způsobem byl navržen numerický model v programu *shrcec* se třemi samostatnými částmi:

- roztažnost vlivem teploty prostředí,
- smršťování/nabývání,
- smršťování/nabývání vlivem počátečních jevů.

Modul roztažnosti vlivem teploty prostředí

Je definován pomocí koeficientu teplotní roztažnosti α_T , základní úrovně teploty T_0 , časového zpoždění Δt_d , a průměrovacího času Δt_a :

$$\varepsilon_t(t) = \alpha_T (T_e - T_0), \quad T_e = f_a(T(t), \Delta t_d, \Delta t_a),$$

kde ε_t představuje poměrné posunutí od roztažnosti vlivem teploty prostředí,
 T_e efektivní teplotu vzorku,
 $T(t)$ funkci teploty prostředí,
 f_a průměrovací funkci,
 Δt_d časové zpoždění s významem prodlevy mezi oteplením prostředí a efektivním oteplením měřeného vzorku,
 Δt_a průměrovací čas sloužící k vyjádření teplotní setrvačnosti měřeného vzorku; pomocí tohoto parametru se snižuje vliv rychlých výkyvů teploty prostředí.

Vybraným parametrům se dává přívlasek efektivní, pokud není přesné, zdali dostatečně vystihují pouze vlastnost měřeného materiálu vzorku.

Modul smršťování/nabývání je dán funkcí:

$$\varepsilon_s(t) = \varepsilon_{s,l}(1 - e^{-vt})$$

kde ε_s představuje poměrné posunutí vlivem smršťování/ nabývání,
 $\varepsilon_{s,l}$ limitní poměrné posunutí,
 v rychlost smrštění/nabývání,
 t čas.

Modul smrštění vlivem počátečních jevů je dán funkcí:

$$\varepsilon_i(t) = c_m f_i(t, c_g, c_s),$$

$$f_i = c_g t + \frac{1}{2t_d}(t_d c_s - 6c_g)t^2 + \frac{1}{2t_d^2}(3c_g + t_d c_s)t^3 + \frac{1}{2t_d^3}(t_d c_s - 2c_g)t^4, \quad t \leq t_d$$

$$f_i = 0, \quad t > t_d$$

- kde ε_i poměrné posunutí vlivem počátečních jevů,
 f_i aproximační funkce počátečních jevů,
 t_d trvání počátečních jevů (čas, kdy počáteční jevy vymizí),
 c_m koeficient vlivu počátečních jevů,
 c_g počáteční gradient aproximační funkce,
 c_s počáteční křivost aproximační funkce.

Výsledné poměrné posunutí je dáno součtem všech tří nezávislých složek:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_t(t) + \varepsilon_s(t) + \varepsilon_i(t)$$

7.3 Výsledné aproximace

Aproximace se využívá, pokud chybějící informace znemožňují získání korektního výsledku. Aproximace poskytuje dostatečně přesné řešení a podstatně snižuje složitost a velikost problém.

Výše popsaný numerický model v programu *shrcec* byl použit k aproximaci časových řad poměrného posunutí a časových řad teploty prostředí. Aproximace byla provedena pomocí genetických algoritmů. Genetický algoritmus je heuristický postup (teorie řešení problémů), který se snaží nalézt řešení, pro které neexistuje aplikovatelný algoritmus. Genetické algoritmy často využívají techniky, které napodobují vývojové procesy. Na začátku procesu je dána funkce, která vyjadřuje kvalitu řešení. Postup se opakuje, a tím se vylepšuje kvalita řešení.

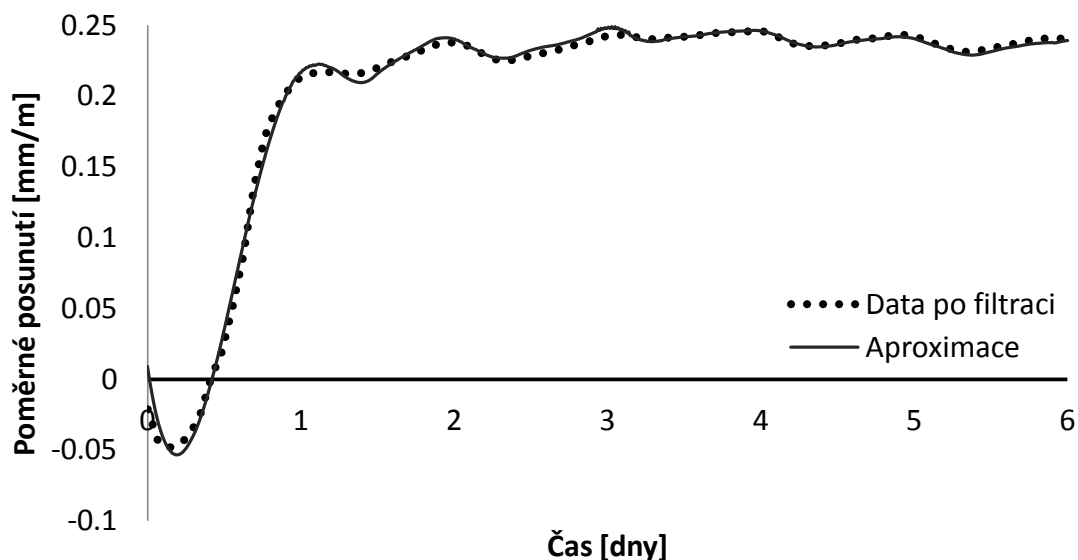
Hlavní výhodou genetického algoritmu je, že nevyžaduje žádné speciální znalosti o cílové funkci, vykazují velmi dobré výsledky u problému s rozsáhlými množinami přístupných řešení, jsou využívány pro nejrozmanitější optimalizační problémy. Mají ovšem problém s nalezením globálního optima, vyžadují značné množství vyhodnocování cílové funkce.

Pomocí genetických algoritmů v programu *shrcec* byly získány hodnoty parametrů numerického modelu – viz příklad v Tab. 7.5 (tabulky v příloze 1).

Tabulka 7.5.: Výsledné hodnoty parametrů aproximace – příklad

Parametr	Hodnoty	Jednotky
Časové zpoždění Δt_d	0.125	den
Koeficient teplotní roztažnosti α_T	$-0.0098 \cdot 10^{-5}$	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
Koeficient vlivu počátečních jevů c_m	-0.1863	-
Limitní poměrné posunutí $\varepsilon_{s,l}$	$0.2436 \cdot 10^{-3}$	-
Počáteční gradient c_g	$5.763 \cdot 10^{-3}$	den^{-1}
Počáteční křivost c_s	-5.8889	-
Průměrovací čas Δt_a	0.2007	den
Rychlost nabývání v	1.4048	den^{-1}
Trvání počátečních jevů t_d	1.4529	den
Základní úroveň teploty T_0	24	$^{\circ}\text{C}$

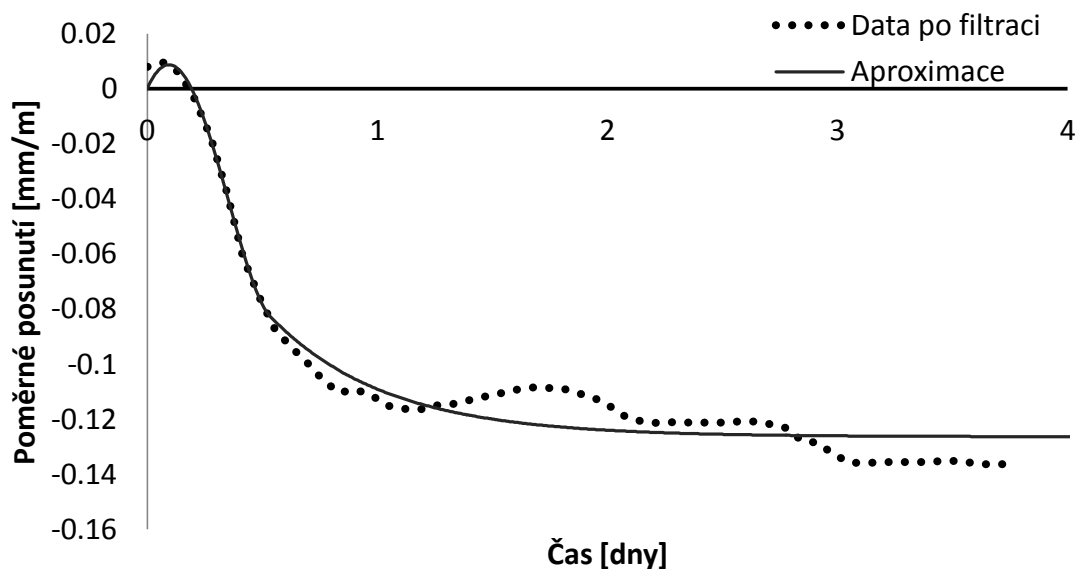
Z grafu na Obr. 7.6 je vidět, že navržený model dobře vystihuje vliv teploty prostředí a vliv nabývání. Vystižení vlivu počátečních jevů je obtížné, jelikož navržená aproximační funkce evidentně nemá dostatečný počet stupňů volnosti. Tento fakt nepříznivě ovlivňuje samostatný aproximační proces.



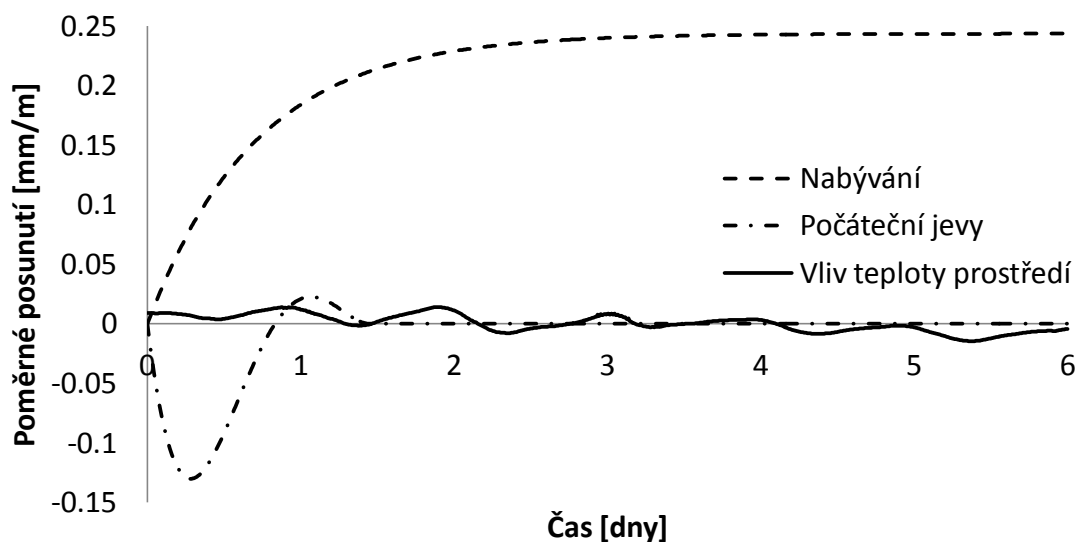
Obr. 7.6: Porovnání výsledků aproximace naměřené časové řady poměrného vzájemného posunutí

V grafu na Obr. 7.7 je zobrazeno, jak vystihuje aproximační křivka naměřená (filtrovaná) poměrná posunutí, pokud nebyla souběžně měřena teplota.

Dále je znázorněno, jak výstižnost aproximace významně snižuje neznalost časového průběhu teploty obklopujícího prostředí zkušebních těles.



Obr. 7.7: Porovnání výsledků aproximace naměřené časové řady poměrného posunutí – příklad, kdy není počítáno s vlivem změny teploty



Obr. 7.8: Graf rozkladu výsledné aproximace celkového poměrného posunutí

Jak bylo uvedeno výše, výsledná aproximace se skládá ze tří nezávislých částí. Jsou to roztažnost vlivem teploty prostředí, vliv počátečních jevů nabývání/smršťování. Pro ilustraci v Obr. 7.8 je graf rozkladu výsledné aproximace celkového poměrného posunutí.

8. Objemové změny těles z lehkého betonu

V této kapitole bude pozornost zaměřena k vyhodnocení experimentů na tělesech z lehkého betonu (FRANTÍK, P., KUCHARCZYKOVÁ, B., KERŠNER, Z., 2010, s. 1–2).

Pro výrobu čerstvého betonu bylo použito pórovité kamenivo Liapor CZ/4-8/600. Celkem byly vyrobeny 3 betonové směsi označené jako LC1, LC2 A LC3. Vyrobené betony se liší pouze mírou nasycení pórovitého kameniva v okamžiku dávkování do mísícího zařízení.

Následující vyhodnocení objemových změn se týká vzorků LC2 A LC3. Do betonové směsi LC3 bylo dávkováno pórovité kamenivo, které bylo nejprve vysušeno v sušičce při teplotě 105°C do ustálené hmotnosti a pak bylo ponořeno do vody, dokud míra nasycení nebyla přibližně 30%. Betonová směs LC2 byla vyrobena z kameniva s tzv. ložnou vlhkostí 13% – kamenivo nebylo před dávkováním nijak upravováno.

U těles z lehkého betonu byla měřena teplota prostředí obklopujících těles. Zkušební tělesa byla sledována po dobu 6 dní.

8.1 LC2 – Kamenivo s ložnou vlhkostí

Zkušební tělesa s kamenivem s ložnou vlhkostí (13%) byla vyhotovena ve třech kusech (vzorek č. 1, 2, 3).

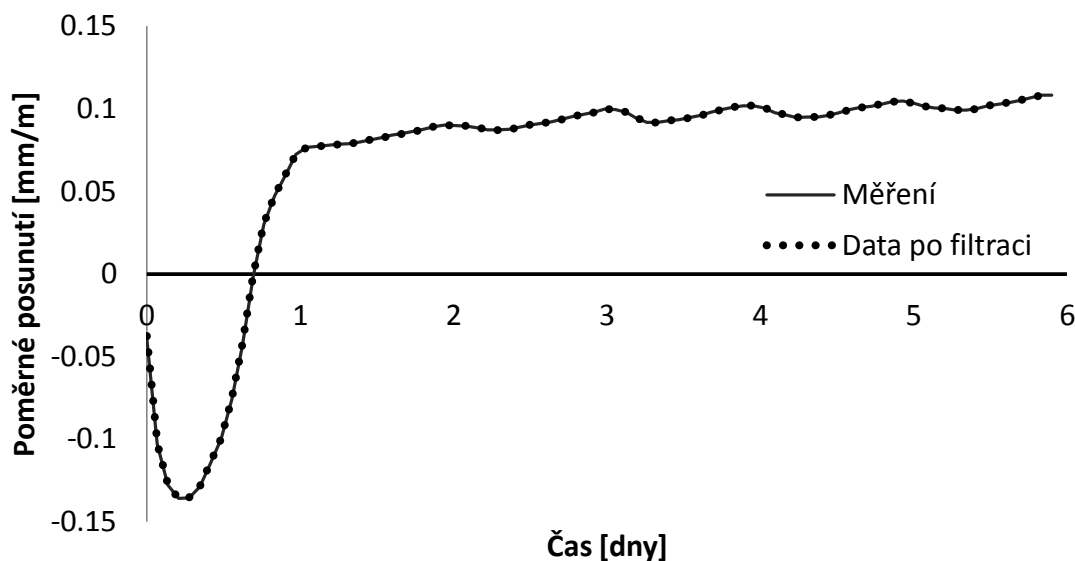
V Obr. 8.1 jsou znázorněny měřené vstupní hodnoty poměrného přetvoření, spolu s filtrovanými daty, pomocí měřícího zařízení – žlab Schleibinger.

V grafu na Obr. 8.2 je znázorněno, že pomocí zohlednění vlivu teploty prostředí lze poměrně dobře vystihnout měření aproximační křivkou.

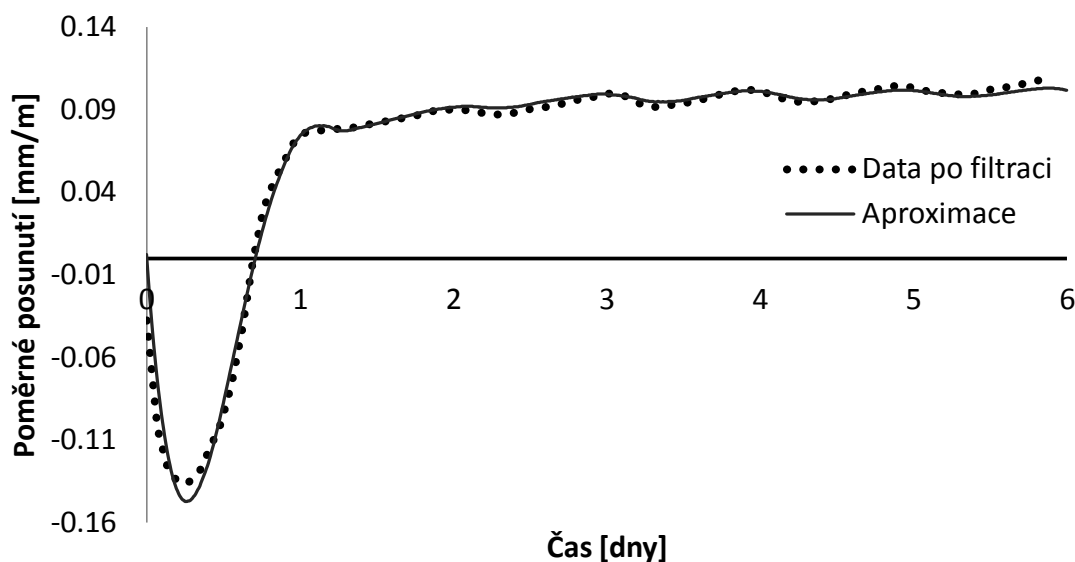
V Obr. 8.3 je znázorněn graf s rozkladem všech tří nezávislých složek výsledné aproximace.

Lehký beton se během prvního dne měření smršťuje, poté začíná nabývat. Po ustálení těchto úkazů jsou hodnoty křivky počátečních jevů nulové. Křivka, vyjadřující vliv nabývání znázorňuje, že u lehkého betonu dochází ve výsledku

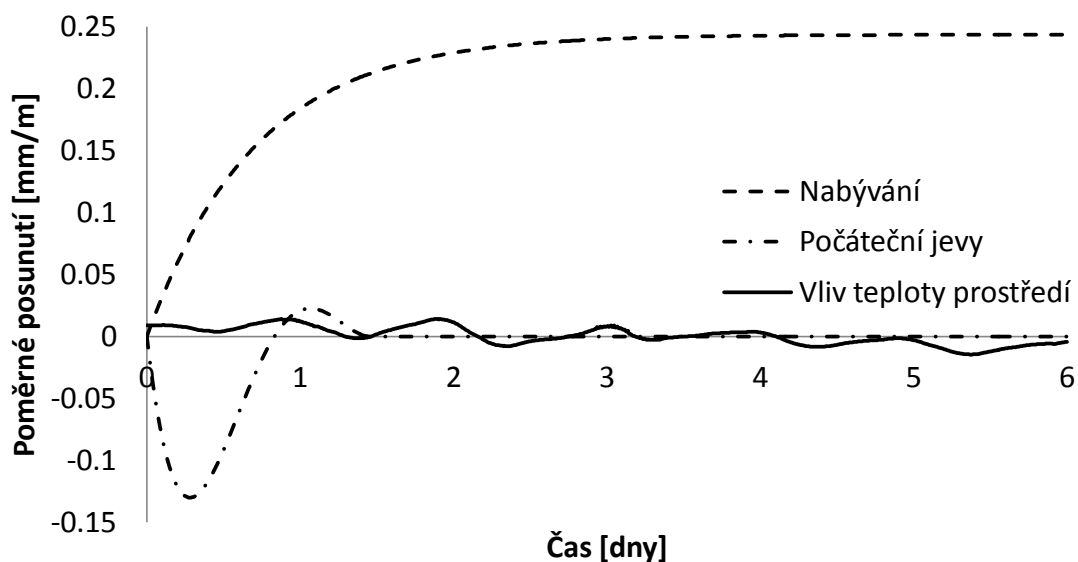
převážně k nabývání objemu kompozitu. Vliv teploty prostředí je důležitý, jelikož upřesňuje výslednou křivku aproximace.



Obr. 8.1: Časové řady naměřeného posunutí čel žlabu pro vzorek č. 1 betonu LC2

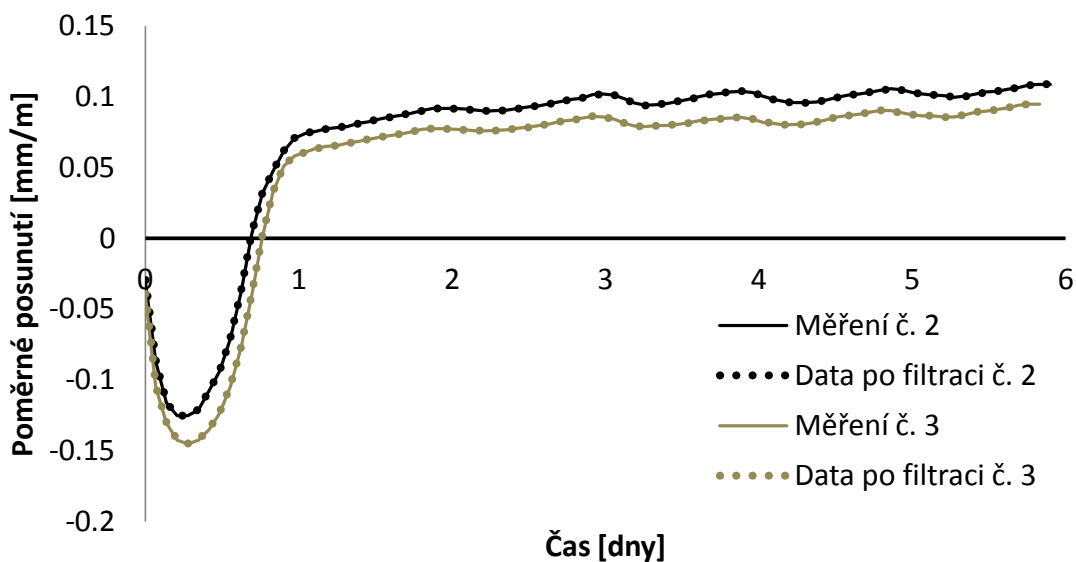


Obr. 8.2: Výsledná aproximace naměřené časové řady poměrného posunutí pro vzorek č. 1 betonu LC2

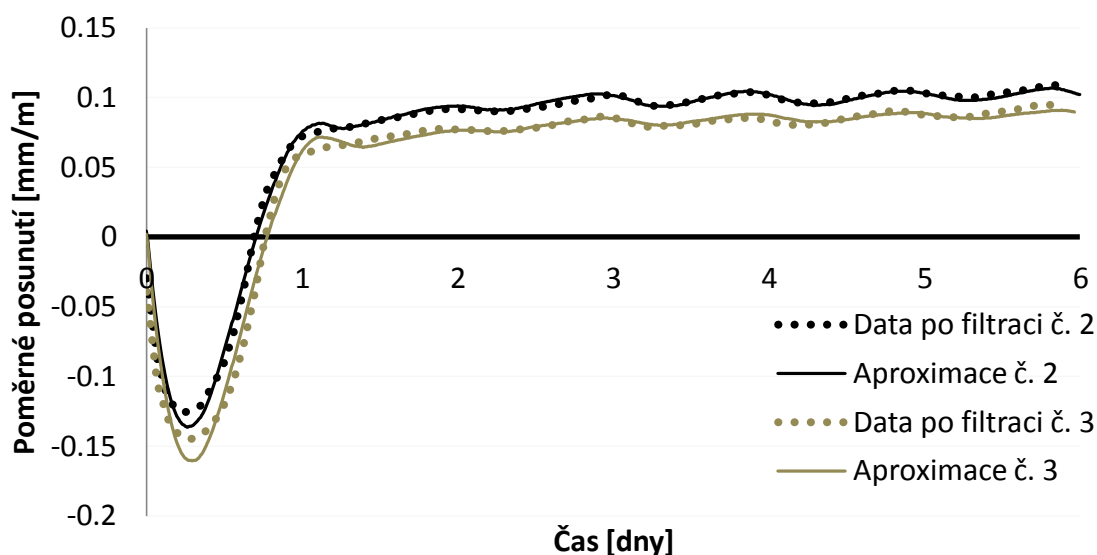


Obr. 8.3: Graf rozkladu výsledné aproximace celkového poměrného posunutí pro vzorek č. 1 betonu LC2

Měřená data pro zkušební tělesa z lehkého kameniva, vzorek č. 2 a č. 3, jsou znázorněná v grafech v Obr. 8.4, Obr. 8.5 společně.



Obr. 8.4: Porovnání časové řady naměřeného poměrného posunutí čel žlabu pro vzorky č. 2 a č. 3 betonu LC2



Obr. 8.5: Porovnání výsledků aproximace naměřené časové řady poměrného posunutí vzorků č. 2 a č. 3 betonu LC2

8.2 LC3 – Kamenivo zcela nasycené vodou

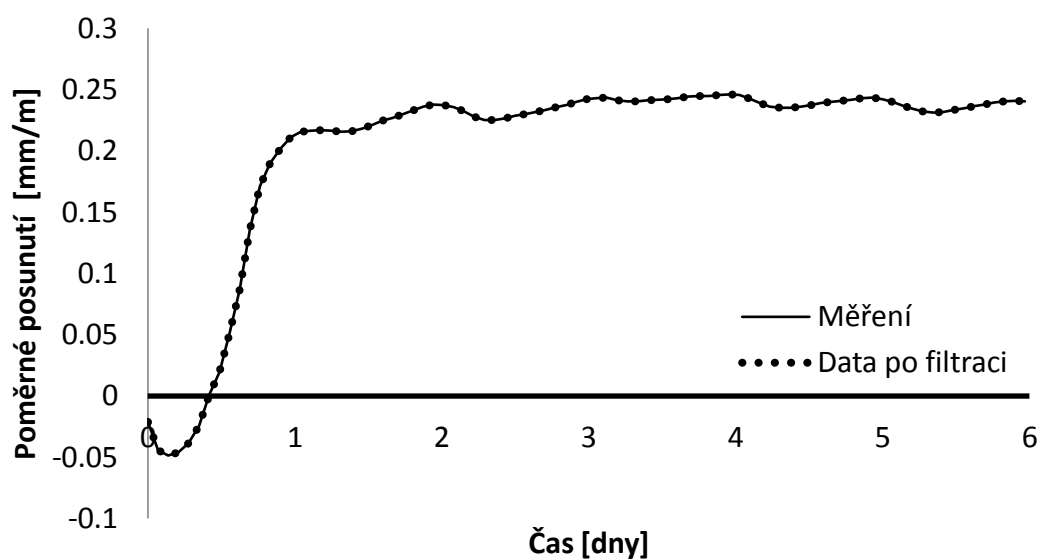
V tomto lehkém betonu bylo použito kamenivo Liapor, které bylo nejprve vysušeno v sušičce a následně ponořeno do vody, až se stupeň nasycení rovnal 30%.

Betonová směs LC3 byla taktéž provedena ve třech formách. V prvních obrázcích bude rozebrán samostatně vzorek č. 1 a následně v dalších grafech budou společně zobrazeny zbylé vzorky (č. 2, č. 3) pro porovnání.

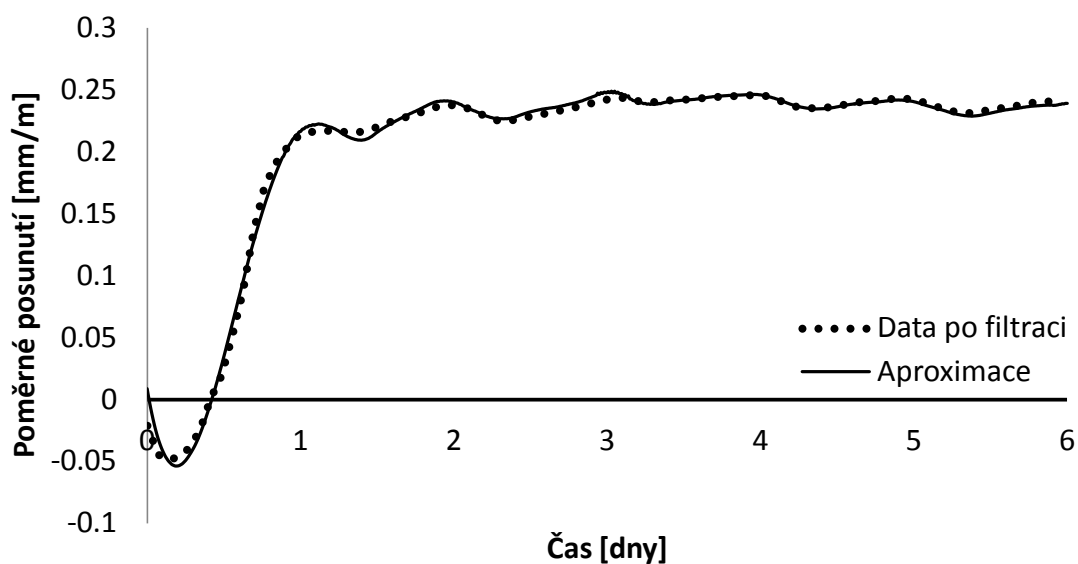
V Obr. 8.6 jsou znázorněny vstupní hodnoty poměrného posunutí a již patřičná filtrovaná data.

V Obr. 8.7 je znázorněna aproximace z numerického modelu v programu *shrcec*, která vlivem zahrnutí teploty prostředí je téměř totožná s naměřeným poměrným posunutím.

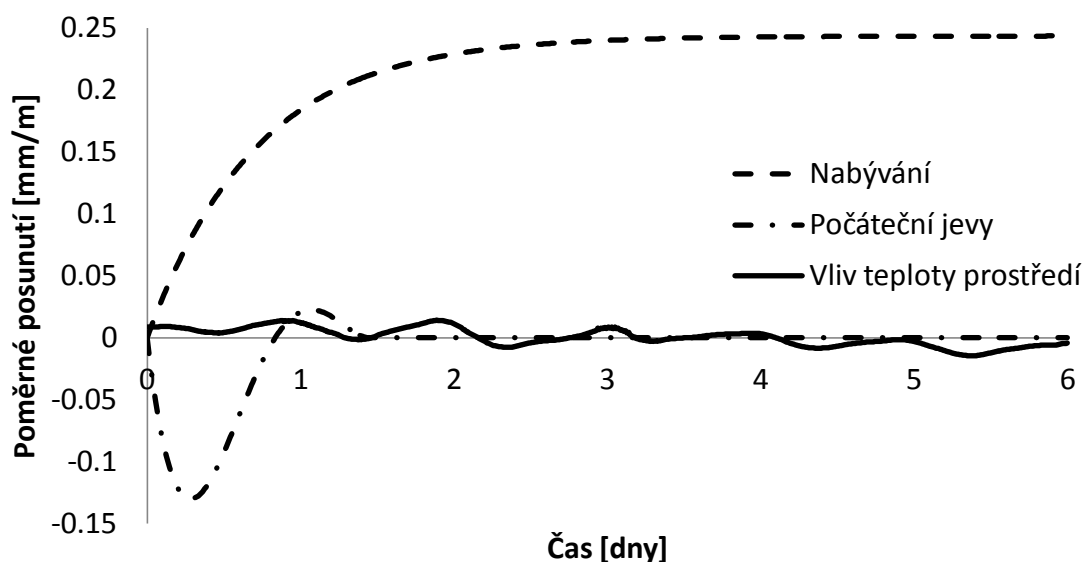
V Obr. 8.8 je opět rozklad grafu výsledné aproximace. Průběhy vypadají obdobně, rozdíl mezi vzorky betonu LC2 a LC3 je v odlišných hodnotách na osách grafu.



Obr. 8.6: Časové řady poměrného posunutí čel žlabu pro vzorek č. 1 betonu LC3

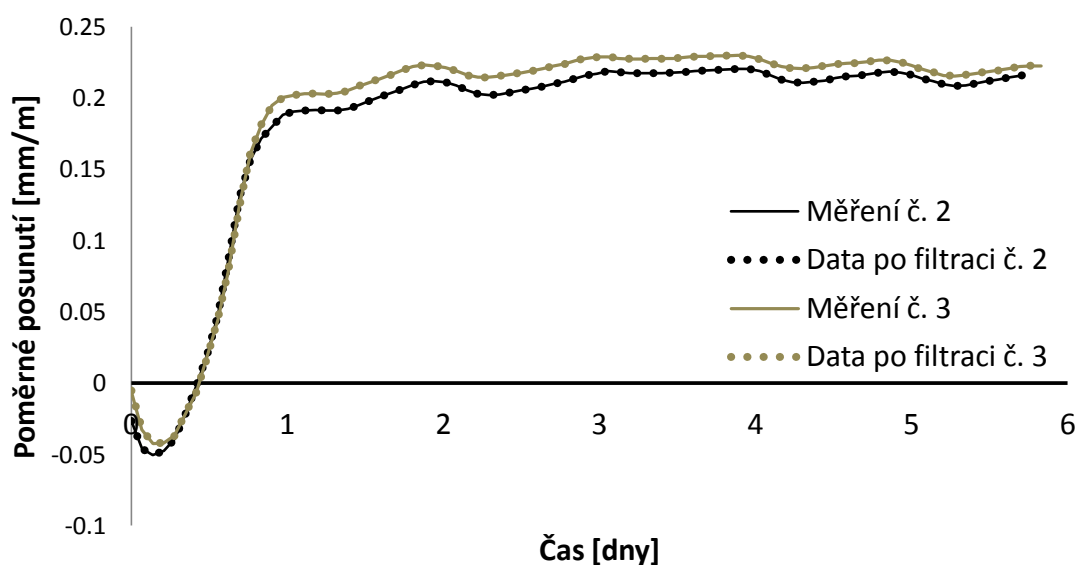


Obr. 8.7: Porovnání výsledku aproximace časové řady poměrného vzájemného posunutí pro vzorek č. 1 betonu LC3

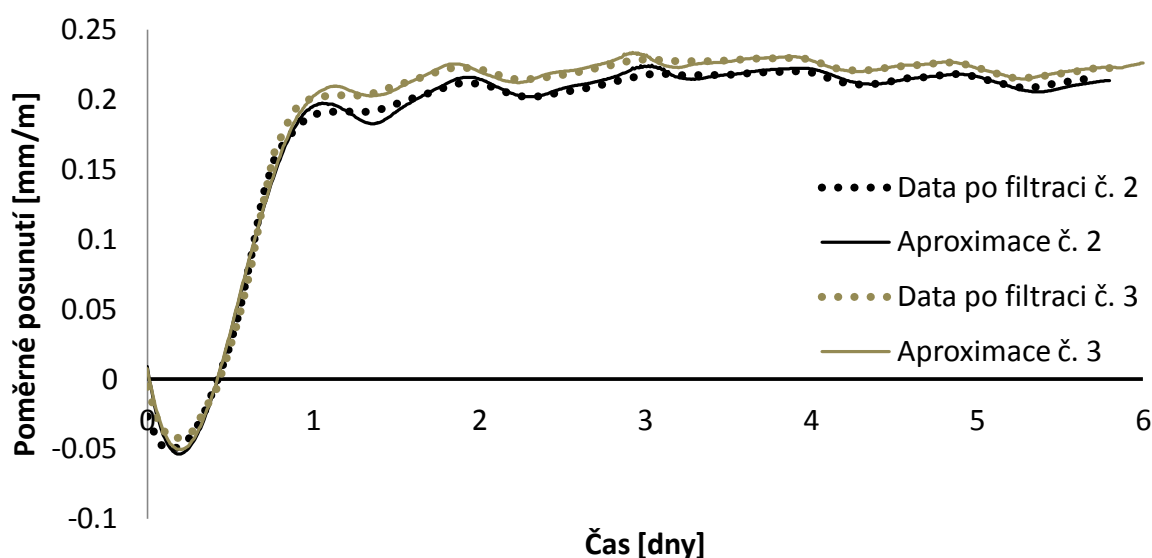


Obr. 8.8: Graf rozkladu výsledné aproximace celkového poměrného posunutí na jednotlivé uvažované složky pro vzorek č. 1 betonu LC3

Zbylé dva vzorky č. 2 a č. 3 zkušebních těles, jsou znázorněny ve společných grafech v Obr. 8.9.



Obr. 8.9: Porovnání časové řady naměřeného poměrného posunutí čel žlabu pro vzorky č. 2 a č. 3 betonu LC3



Obr. 8.10: Porovnání výsledků aproximace naměřené časové řady poměrného vzájemného posunutí pro vzorky č. 2, č. 3 betonu LC3

8.3 Porovnání LC2 a LC3 – dílčí závěr

U betonu ze směsi LC2 se na počátku fáze tuhnutí/tvrdnutí projevuje větší smrštění, ale poté je i menší nabývání než u betonu ze směsi LC3. Přesné hodnoty jsou uvedeny v tabulkách 8.11 a 8.12.

Tabulka 8.1: Hodnoty smrštění a nabývání betonu LC2

Vzorek	Max. hodnota smrštění [mm/m]	Aritmetický průměr [mm/m]	Max. hodnota nabývání [mm/m]	Aritmetický průměr [mm/m]
č. 1	-0.1473	-0.1475	0.103	0.0986
č. 2	-0.135		0.1025	
č. 3	-0.1602		0.0904	

Tabulka 8.12: Hodnoty smrštění a nabývání betonu LC3

Vzorek	Max. hodnota smrštění [mm/m]	Aritmetický průměr [mm/m]	Max. hodnota nabývání [mm/m]	Aritmetický průměr [mm/m]
č. 1	-0.0535	-0.0533	0.2388	0.2243
č. 2	-0.0534		0.2112	
č. 3	-0.053		0.2229	

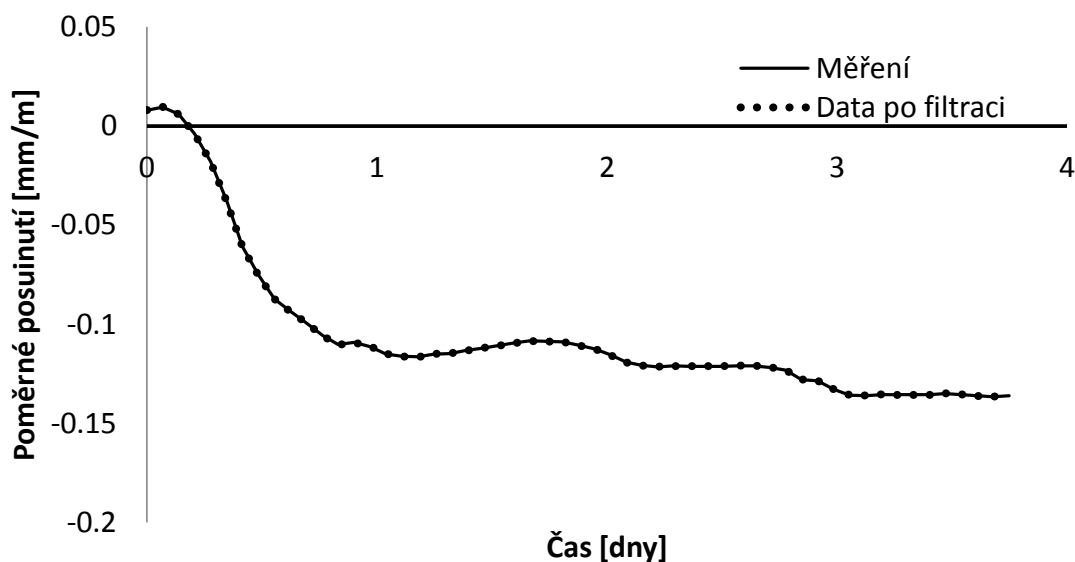
9. Objemové změny těles z obyčejného betonu

Obdobně jako v předchozí kapitole se následující odstavce budou týkat vyhodnocení experimentů na tělesech z obyčejného betonu.

Pro výrobu betonové směsi z obyčejného betonu bylo použito kamenivo frakce 8 a 22 mm. Z daných podkladů nebylo uvedeno, jaký druh kameniva byl použit. U betonové směsi z kameniva s frakcí 8 mm byly vyrobeny dva zkušební vzorky. Betonové kompozity s kamenivem frakce 22 mm byly vyrobeny ve třech provedeních. Tato měření byly zaznamenány po dobu 4 dní, přičemž nebyla měřena teplota prostředí.

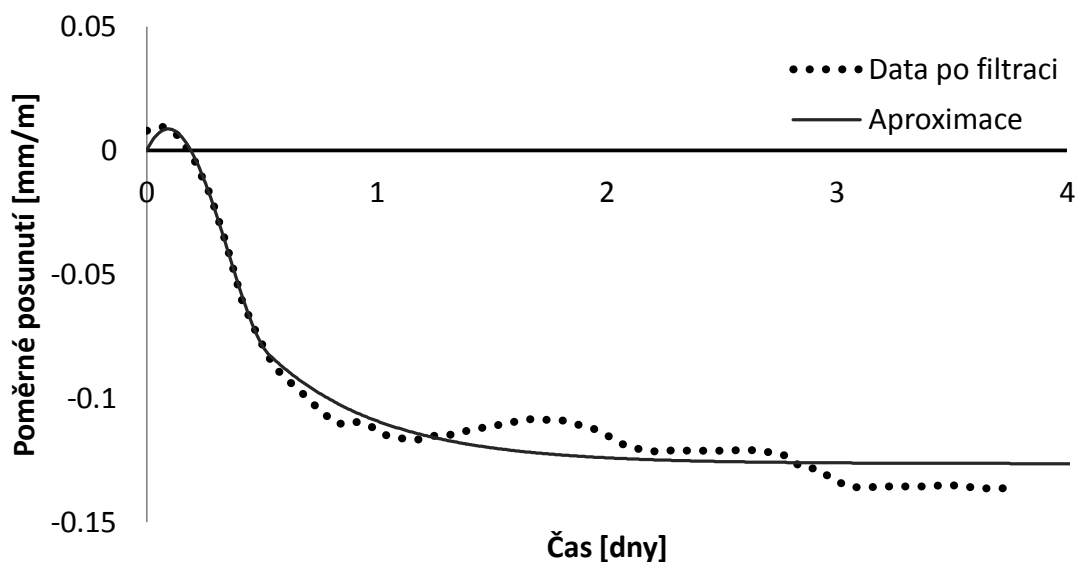
9.1 Obyčejný beton s kamenivem frakce max. 8 mm

V Obr. 9.1 jsou znázorněna vstupní data poměrného posunutí s daty filtrovanými, které jsou použity ve výpočtu numerického modelu v programu *shrcec*.

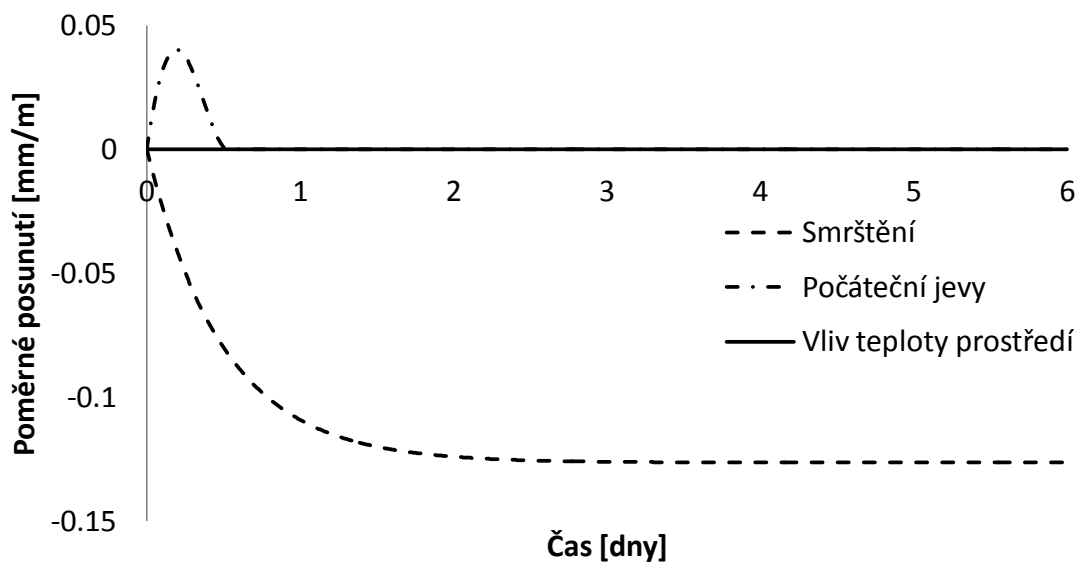


Obr. 9.1: Časové řady naměřeného poměrného posunutí čel žlabu pro vzorek č. 1 betonu s kamenivem frakce 8 mm

Graf na Obr. 9.2 znázorňuje aproximační křivku u obyčejného betonu s kamenivem frakce 8 mm. Tato křivka se zcela neztotožňuje s naměřeným poměrným posunutím, jak bylo zmíněno, u těchto vzorků nebyla měřena teplota.



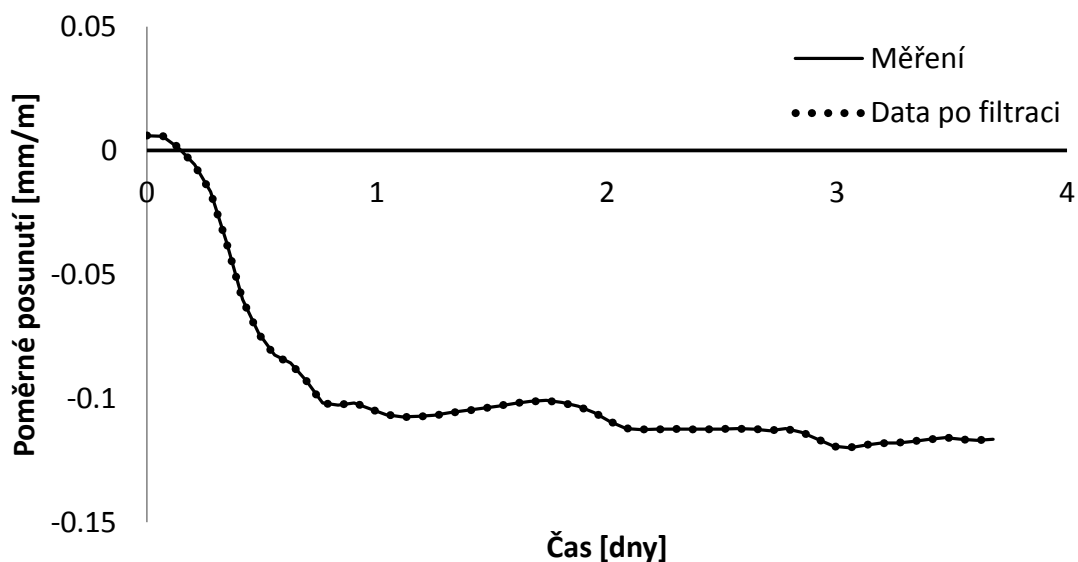
Obr. 9.2: Porovnání výsledku aproximace naměřené časové řady poměrného posunutí pro vzorek č. 1 beton s kamenivem frakce 8 mm



Obr. 9.3: Graf rozkladu aproximací celkového poměrného posunutí pro vzorek č. 1 betonu s kamenivem frakce 8 mm

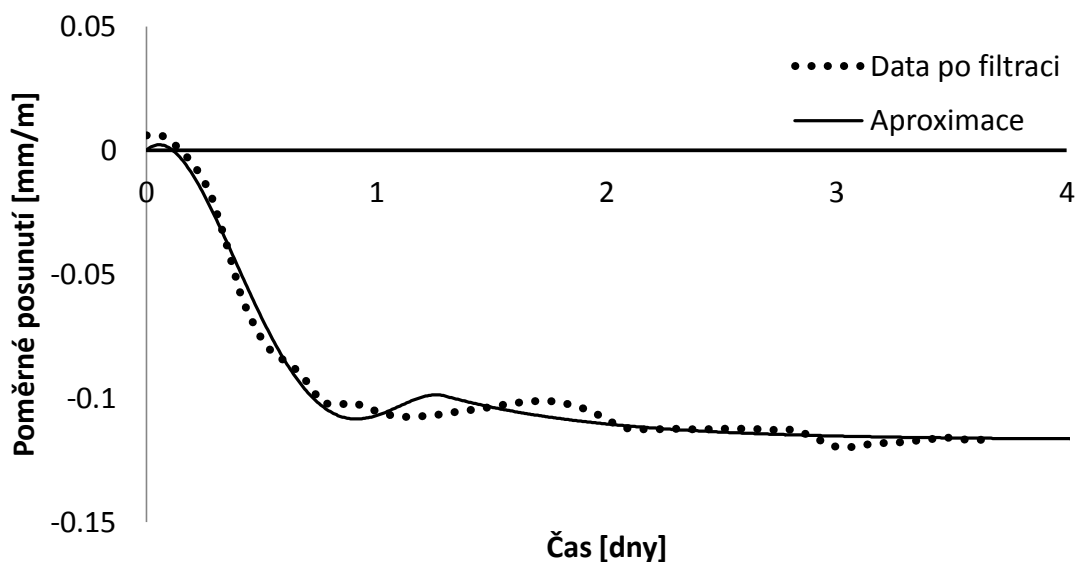
V Obr 9.3 je znázorněn rozklad grafu výsledné aproximace. Počáteční jevy znázorňují, že v prvním dni měření probíhá nabývání. Ve výsledku se betonová směs smršťuje. Vliv teploty je nulový (teplota prostředí nebyla měřena).

V Obr. 9.4 a Obr. 9.5 je znázorněn vzorek č. 2 z betonu s frakcí max. 8 mm.



Obr. 9.4: Časové řady naměřeného poměrného posunutí čel žlabu pro vzorek č. 2 betonu s kamenivem frakce 8 mm

V Obr. 9.5 je znázorněna výsledná aproximace.

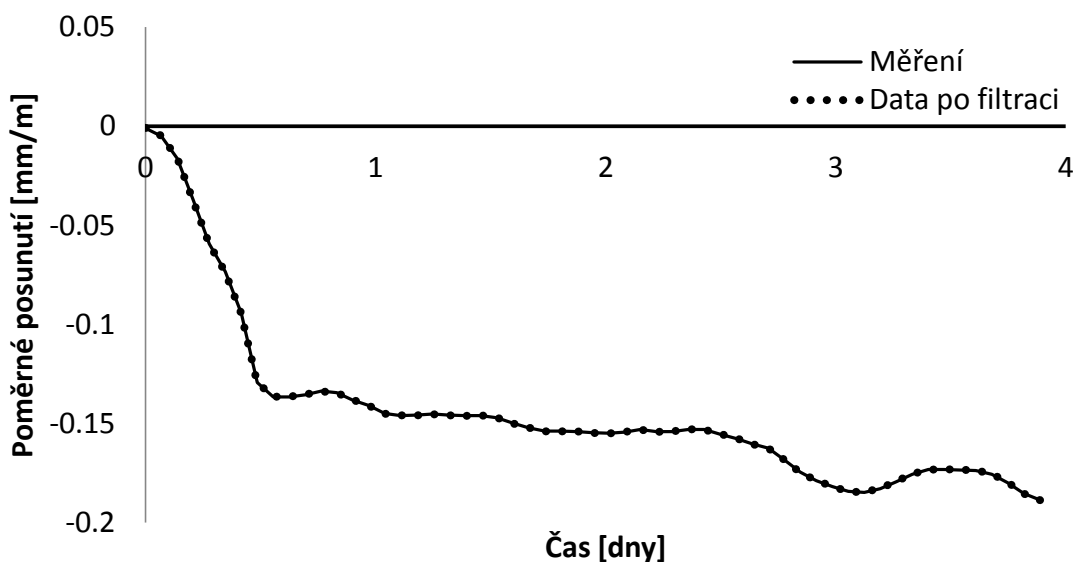


Obr. 9.5: Porovnání výsledku aproximace naměřené časové řady poměrného posunutí pro vzorek č.2 betonu s kamenivem frakce 8 mm

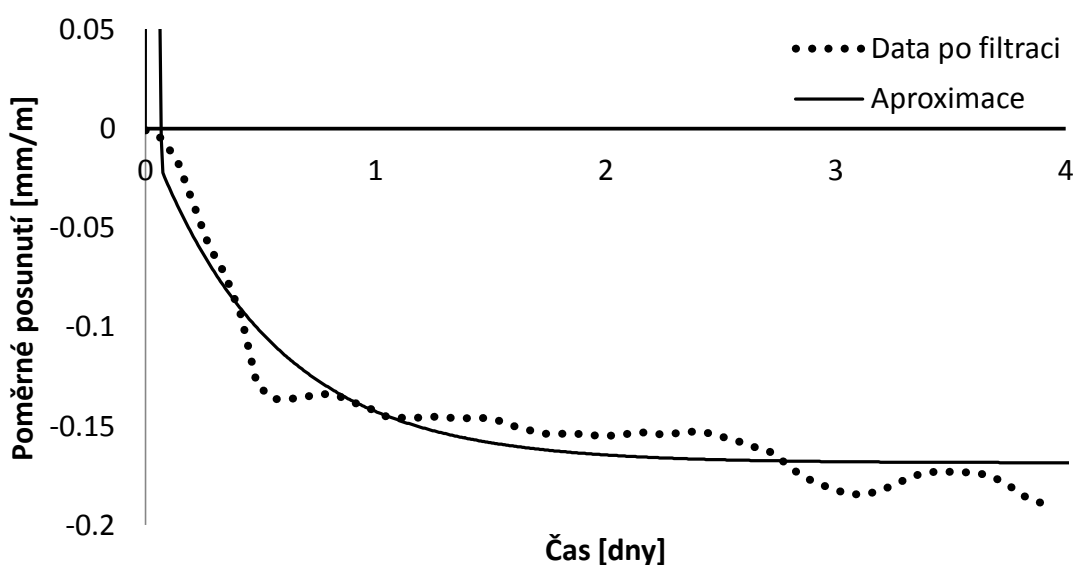
9.2 Obyčejný beton s kamenivem frakce max. 22 mm

U betonové směsi s kamenivem frakce max. 22 mm také nebyla měřena teplota prostředí. Byla vyrobena tři zkušební tělesa. Měření bylo zaznamenáváno 4 dny.

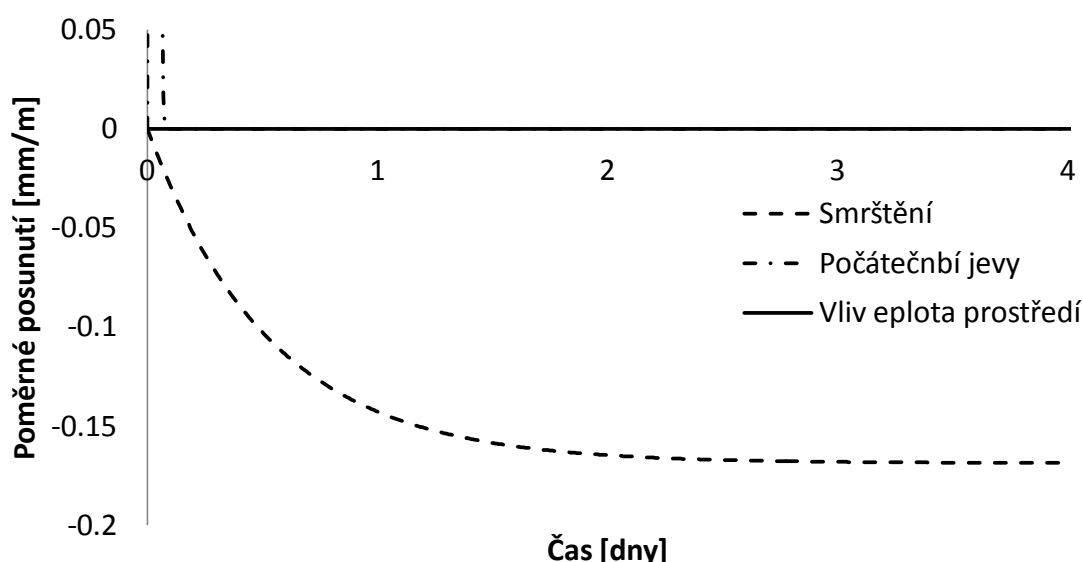
V grafu Obr. 9.6 jsou zobrazeny vstupní hodnoty poměrného posunutí spolu s daty filtrovanými.



Obr. 9.6: Časové řady naměřeného poměrného posunutí čel žlabu pro vzorek č. 1 betonu s kamenivem frakce 22 mm



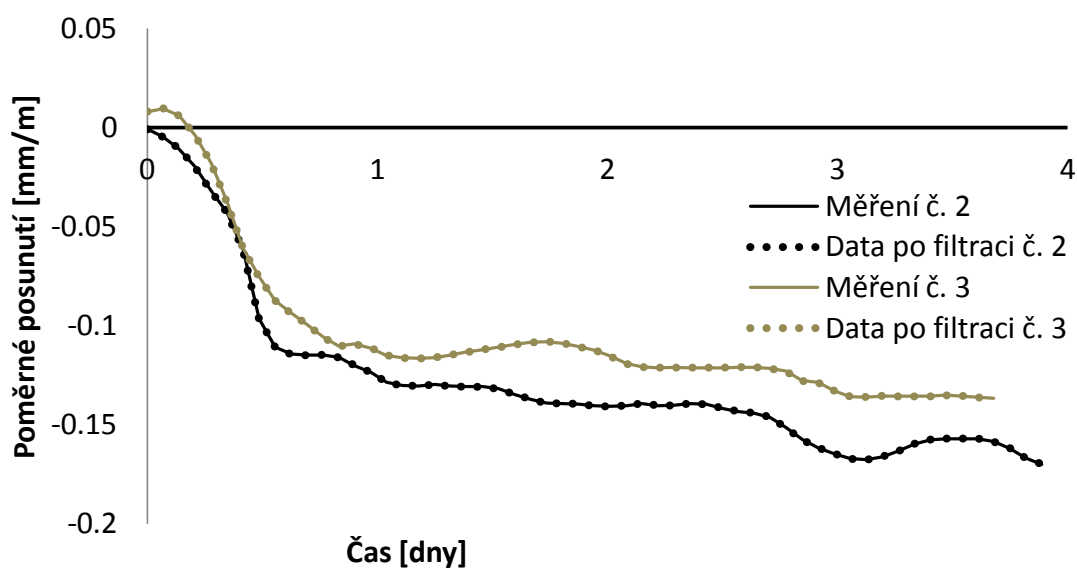
Obr. 9.7: Porovnání výsledků aproximace naměřené časové řady poměrného vzájemného posunutí pro vzorek č. 1 betonu s kamenivem frakce 22 mm



Obr. 9.8: Graf rozkladu výsledné aproximace celkového poměrného posunutí na jednotlivé uvažované složky pro vzorek č. 1 betonu s kamenivem frakce 22 mm

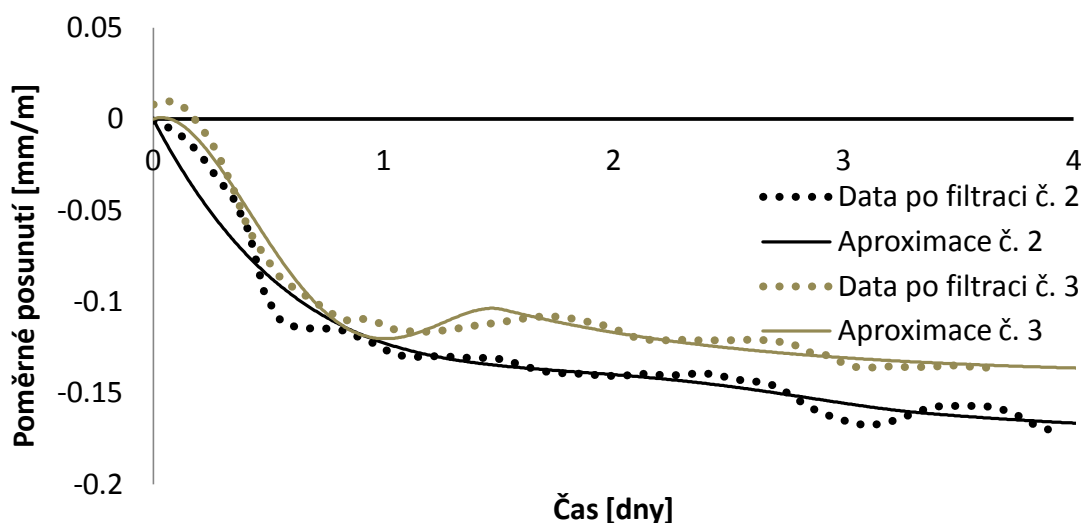
V Obr. 9.7 a 9.8 je vidět, že aproximační křivka dosahuje na počátku vysokých hodnot (nabývání), zřejmě se zde projevil nedostatek naměřených údajů pro výstižnou aproximaci.

Zbylé dva vzorky č. 2 a č. 3 budou znázorněny v grafech na Obr. 9.9 a Obr. 9.10.



Obr. 9.9: Porovnání časové řady naměřeného poměrného posunutí čel žlabu pro vzorky č. 2 a č. 3 betonu s kamenivem frakce 22 mm

V Obr. 9.9 je vidět, že i když jsou zkušební vzorky z jedné betonové směsi, které jsou uloženy ve stejném prostředí, jejich poměrná posunutí jsou odlišná.



Obr. 9.10: Porovnání výsledků aproximace naměřené časové řady poměrného vzájemného posunutí pro vzorky č. 2a č. 3 betonu s kamenivem frakce 22 mm

9.3 Porovnání obyčejného betonu s kamenivem frakce max. 8 mm a max. 22 mm – dílčí závěr

Obyčejný beton s kamenivem frakce max. 8 mm a max. 22 mm při počáteční fázi nabývá. Následný proces smršťování probíhá u betonových těles ze směsí obou kameniv podobně. Hodnoty smršťování jsou uvedeny v tabulce č. 9.11 a tabulce č. 9.12. U žádného vzorku těchto betonů s rozdílnými frakcemi kameniva nebyla měřena teplota prostředí, proto se aproximační křivka zcela neztotožňuje s křivkou znázorňující poměrné posunutí čel žlabu.

Tabulka 9.11: Hodnoty smrštění a nabývání betonu s max. zrnem kameniva 8 mm

Vzorek	Max. hodnota smrštění [mm/m]	Aritmetický průměr [mm/m]	Max. hodnota nabývání [mm/m]	Aritmetický průměr [mm/m]
č. 1	-0.1263	-0.1213	0.0085	0.0054
č. 2	-0.1162		0.0022	

Tabulka 9.12: Hodnoty smrštění a nabývání betonu s max. zrnem kameniva 22 mm

Vzorek	Max. hodnota smrštění [mm/m]	Aritmetický průměr [mm/m]	Max. hodnota nabývání [mm/m]	Aritmetický průměr [mm/m]
č. 1	-0.1685	-0.157	0.4757	0.1586
č. 2	-0.1663		0	
č. 3	-0.1361		0	

10. Závěr

V bakalářské práci se prokázalo, že numerickým modelem v programu *shrcec* lze dobře vystihnout naměřená poměrná posunutí vyšetřovaných těles z cementových kompozitů v raném stádiu jejich tuhnutí a tvrdnutí. K přesnosti aproximační křivky poměrného posunutí přispívá záznam průběhu teploty prostředí obklopujících těles.

Beton s lehkým kamenivem se na začátku měření smršťuje. Smrštění probíhá vlivem počátečních jevů. Přibližně po jednom dni záznamu měření se počáteční vliv ustálí a beton s lehkým kamenivem nabývá na svém objemu.

Beton s obyčejným kamenivem s frakcí max. 8 mm na počátku měření nabývá, ale po cca 0,5 dne se počáteční vliv nabývání mění v ustálené smrštění betonových těles. U těchto betonů nebyla měřena teplota okolního prostředí, tudíž se aproximační křivky zcela neshodují s experimentálními daty, vystižená je však závislosti poměrného posunutí v čase.

11. Seznam použitých zdrojů

Literatura

- [1] COLLEPARDI, M. *Moderní beton*. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009, 342 s. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [2] ŠMERDA, Z., KRÍSTEK, V. *Dotvarování a smršťování betonových prvků a konstrukcí*. SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha, 1978, 232 s.
- [3] LITOŠ, J. *Objemové změny cementových past ve fázi tuhnutí*. České vysoké učení technické, Praha, 2010, 140 s. ISBN: 978-80-01-04700-2
- [4] PROCHÁZKA, J. a kol. *Navrhování betonových konstrukcí 1, Prvky z prostého a železového betonu*. Česká betonářská společnost ČSSI a ČSB Servis, s.r.o., Praha, 2009, 314 s.
- [5] ŠMERDA, Z. *Dotvarování, smršťování a nelineární problémy betonových konstrukcí: Konference: Sborník přednášek*. Dům techniky ČVTS, Brno, 1979, 131 s.
- [6] TERZIJSKI, I. *CM1 – Základy navrhování konstrukcí*. Skripta VUT – FAST Brno, 66 s.
- [7] FRANTÍK, P., KUCHARCZYKOVA, B., KERŠNER, Z. *Aproximace objemových změn těles z lehkých betonů v raném stádiu tuhnutí a tvrdnutí*. Structural and Physical Aspects of Civil Engineering, 2010

Normy

- [8] ČSN EN 1992-1-1 *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*, 2006, 213 s.

Internetové adresy

- [9] KŘÍSTEK, V., KOHOUTOVÁ, A., VČELOVÁ, A. *Dotvarování a smršťování betonu*. České vysoké učení technické – učební pomůcka, Katedra betonových konstrukcí a mostů, Praha. [online]. [cit. 2012-03-10]. Dostupné z: http://concrete.fsv.cvut.cz/~kristek/ATK1/ATK1_prednaska_1cast.pdf
- [10] WIKIPEDIA. *Genetický algoritmus*. [online]. [cit. 2012-03-20]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Genetick%C3%BD_algoritmus
- [11] WIKIPEDIA. *Kompozitní materiál*. [online]. [cit. 2012-03-20]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Kompozitn%C3%AD_materi%C3%A1l
- [12] WIKIPWDIA. *Cement*. [online]. [cit. 2012-03-20]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Cement>
- [13] EBETON. *Slovník pojmů: Smrštění betonu*. [online]. [cit. 2012-04-1]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/smrstovani-betonu>

12. Seznam použitých symbolů a zkratk

Symbol	Význam	Jednotka
A_c	plocha průřezu	mm^2
c	hmotnost cementu	kg
c_g	počáteční gradient aproximační funkce	den^{-1}
c_m	koeficient vlivu počátečních jevů	-
c_s	počáteční křivost aproximační funkce	-
$E_{b(t)}$	modul pružnosti	MPa
E_c	tečnový modul	MPa
$E_{c,eff}$	účinný modul pružnosti betonu	MPa
E_{cm}	střední hodnota modulu pružnosti	MPa
f_a	průměrovací funkce	-
f_c	pevnost betonu v okamžiku zatížení	MPa
f_{cm}	průměrná hodnota pevnosti betonu v tlaku	MPa
h_0	náhradní rozměr prvku	mm
l	délka prvku	mm
$R_{b(t)}$	pevnost betonu	MPa
RH	relativní vlhkost	%
RH_0	100	%
t	stáří betonu v čase	den
t_0	okamžik ztuhnutí čerstvého betonu	den
t_1	okamžik zatížení	den
t_2	okamžik odlehčení	den
t_3	opětovné zatížení	den
$t_{0,T}$	stáří betonu v okamžiku vnesení zatížení	den
$t - t_0$	neupravená doba trvání zatížení	den
T_e	efektivní teplota vzorku	$^{\circ}\text{C}$
$T(t)$	funkce teploty prostředí	-
$T_{(\Delta t_i)}$	teplota během období Δt_i	$^{\circ}\text{C}$
u	obvod prvku vystavený okolnímu prostředí	mm
v	rychlost nabývání	den^{-1}
v_m	hmotnost účinné vody	kg
α	součinitel teplotní roztažnosti	K^{-1}
$\alpha_{1,2,3}$	součinitel vlivu pevnosti betonu	-
$\alpha_{ds1,2,3}$	součinitel, který závisí na druhu cementu	-
$\beta_{(f_{cm})}$	součinitel, vystihující vliv pevnosti betonu	-
β_H	součinitel závislý na relativní vlhkosti	-
$\beta_{(t_0)}$	součinitel, vystihující vliv stáří betonu v okamžiku	-
$\beta_{(t,t_0)}$	součinitel časového průběhu dotvarování po zatížení	-

Symbol	Význam	Jednotka
ΔT	teplotní rozdíl	$^{\circ}K$
Δt_a	průměrovací čas	den
Δt_d	časové zpoždění	den
Δt_i	počet dní, v nichž převládá teplota T	den
$\Delta \varepsilon_{c,lt}$	vratná část dlouhodobého přetvoření	-
ε_c	přetvoření betonu bezprostředně po jeho zatížení	-
ε_{ca}	poměrné přetvoření z autogenního smrštění	-
ε_{cd}	poměrné přetvoření ze smrštění vysycháním	-
$\varepsilon_{c,lt}$	zpožděné přetvoření od dotvarování	-
ε_{cs}	poměrné přetvoření ze smrštění	-
$\varepsilon_{c,st}$	krátkodobé přetvoření od σ_c	-
ε_d	dotvarování	-
ε_e	pružné přetvoření	-
ε_i	poměrné posunutí vlivem počátečních jevů	mm/m
$\varepsilon_{s,l}$	limitní poměrné přetvoření	-
ε_t	poměrné posunutí vlivem modulu roztažnosti vlivem	mm/m
σ_c	napětí betonu	MPa
φ_0	základní součinitel dotvarování	-
φ_{RH}	součinitel, vystihující vliv relativní vlhkosti	-
$\varphi_{(t,t_0)}$	konečná hodnota součinitele dotvarování	-

13. Seznam příloh

1. VÝSLEDNÉ HODNOTY PARAMETRŮ APROXIMACE..... - I -

Příloha č. 1

1. Výsledné hodnoty parametrů aproximace

Lehký beton LC2

Parametr	Vzorek č. 1	Vzorek č. 2	Vzorek č. 3	Jednotka
Časové zpoždění Δt_d	0.1492	0.0749	0.1437	den
Koeficient teplotní roztažnosti α_T	$-0.0056 \cdot 10^{-5}$	$-0.0099 \cdot 10^{-5}$	$-0.0056 \cdot 10^{-5}$	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
Koeficient vlivu počátečních jevů c_m	-0.22	-0.1893	-0.4763	-
Limitní poměrné posunutí $\varepsilon_{s,l}$	$0.1034 \cdot 10^{-3}$	$0.1073 \cdot 10^{-3}$	$0.0912 \cdot 10^{-3}$	-
Počáteční gradient c_g	$6.5348 \cdot 10^{-3}$	$7.0830 \cdot 10^{-3}$	$2.9702 \cdot 10^{-3}$	den^{-1}
Počáteční křivost c_s	-3.7872	-3.5262	-1.9496	-
Průměrovací čas Δt_a	0.275	0.2996	0.2	den
Rychlost nabývání v	1.0452	1.016	0.8864	den^{-1}
Trvání počátečních jevů t_d	1.3	1.2822	1.4165	den
Základní úroveň teploty T_0	24	24	24	$^{\circ}\text{C}$

Lehký beton LC3

Parametr	Vzorek č. 1	Vzorek č. 2	Vzorek č. 3	Jednotka
Časové zpoždění Δt_d	0.1250	0.1124	0.0624	den
Koeficient teplotní roztažnosti α_T	$-0.0098 \cdot 10^{-5}$	$-0.0098 \cdot 10^{-5}$	$-0.0085 \cdot 10^{-5}$	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
Koeficient vlivu počátečních jevů c_m	-0.1863	-0.2038	-0.2039	-
Limitní poměrné posunutí $\varepsilon_{s,l}$	$0.2436 \cdot 10^{-3}$	$0.2201 \cdot 10^{-3}$	$0.2281 \cdot 10^{-3}$	-
Počáteční gradient c_g	$5.7630 \cdot 10^{-3}$	$5.0150 \cdot 10^{-3}$	$4.8853 \cdot 10^{-3}$	den^{-1}
Počáteční křivost c_s	-5.8889	-5.5743	-4.9428	-
Průměrovací čas Δt_a	0.2007	0.2117	0.1499	den
Rychlost nabývání v	1.4048	1.3085	1.4675	den^{-1}
Trvání počátečních jevů t_d	1.4529	1.4046	1.4898	den
Základní úroveň teploty T_0	24	24	24	$^{\circ}\text{C}$

Obyčejný beton s kamenivem frakce max. 8 mm

Parametr	Vzorek č. 1	Vzorek č. 2	Jednotka
Časové zpoždění Δt_d	0.0415	0.1606	den
Koeficient teplotní roztažnosti α_T	$-4.6566 \cdot 10^{-5}$	$-4.6566 \cdot 10^{-5}$	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
Koeficient vlivu počátečních jevů c_m	0.2522	0.2546	-
Limitní poměrné posunutí $\varepsilon_{s,l}$	$-0.12563 \cdot 10^{-3}$	$-0.1167 \cdot 10^{-3}$	-
Počáteční gradient c_g	$1.7413 \cdot 10^{-3}$	$1.0074 \cdot 10^{-3}$	den^{-1}
Počáteční křivost c_s	9.5134	-3.0584	-
Průměrovací čas Δt_a	0.2047	0.2147	den
Rychlost nabývání v	1.9864	1.4551	den^{-1}
Trvání počátečních jevů t_d	1.5337	1.2995	den
Základní úroveň teploty T_0	24	24	$^{\circ}\text{C}$

Obyčejný beton s kamenivem frakce max. 22 mm

Parametr	Vzorek č. 1	Vzorek č. 2	Vzorek č. 3	Jednotka
Časové zpoždění Δt_d	0.2251	0.0992	0.1972	den
Koeficient teplotní roztažnosti α_T	$-4.6566 \cdot 10^{-5}$	$-4.6566 \cdot 10^{-5}$	$-4.6566 \cdot 10^{-5}$	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
Koeficient vlivu počátečních jevů c_m	-6.1732	-0.0814	0.0832	-
Limitní poměrné posunutí $\varepsilon_{s,l}$	$-0.1686 \cdot 10^{-3}$	$-0.1751 \cdot 10^{-3}$	$-0.1402 \cdot 10^{-3}$	-
Počáteční gradient c_g	$-28.4374 \cdot 10^{-3}$	$1.3519 \cdot 10^{-3}$	$2.0552 \cdot 10^{-3}$	den^{-1}
Počáteční křivost c_s	-0.5965	-0.3984	-8.9983	-
Průměrovací čas Δt_a	0.3440	0.0814	0.3361	den
Rychlost nabývání v	1.8690	0.7506	0.8954	den^{-1}
Trvání počátečních jevů t_d	0.0778	3.3445	1.5236	den
Základní úroveň teploty T_0	24	24	24	$^{\circ}\text{C}$